

## **SISTEMA COMPUTACIONAL BASEADO EM ALGORITMO GENÉTICO PARA PLANEJAMENTO E RECOMPOSIÇÃO DE REDES DE TELECOMUNICAÇÕES**

**Maurício Barreto, José V. Canto dos Santos, Marta B. Villamil**  
PIPCA - UNISINOS  
Av. UNISINOS, 950 ó São Leopoldo - RS  
tiomau@gmail.com, jvcanto@unisinis.br, mbvillamil@unisinis.br

### **RESUMO**

O crescimento do tráfego nas redes de telecomunicações de serviços de banda larga, telefonia fixa e móvel tem demandado esforços nos estudos de planejamento e recomposição das redes. A complexidade das redes aumenta de acordo com as restrições impostas pela capacidade de investimentos e custos operacionais na obtenção de topologias a serem adotadas. Para resolver problemas de planejamento e recomposição de redes de telecomunicações é imprescindível a utilização de recurso computacional, já que estes são problemas de otimização combinatória. Neste artigo é apresentado um sistema computacional para planejar e recompor redes. As estratégias de planejamento e recomposição são obtidas através de um algoritmo genético. O sistema envolve também recursos heurísticos e o algoritmo de Dijkstra. Além disto, redes fictícias são usadas na modelagem para obtenção de topologias de rede, possibilitando a análise do tráfego frente à incidência de falhas. Testes realizados para diversas redes mostraram o satisfatório desempenho do sistema.

**PALAVRAS CHAVE.** Planejamento de redes de telecomunicações. Redes ASON.  
Simulação de múltiplas falhas em rede de transporte.

**Área principal.** PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações

### **ABSTRACT**

This The growth of traffic on telecommunications networks for broadband service and for fixed and mobile telephony has demanded increasing efforts in the planning and restoration of these networks. The complexity of the networks increases along with the restrictions imposed by the investment capacity and the operating costs for obtaining topologies to be adopted. To solve issues in the planning and restoration of telecommunications networks is essential to use computational resources, since they are combinatorial optimization problems. This paper presents a computational system designed to plan and restore this type of networks. The strategies of planning and restoration are obtained through a genetic algorithm. The computational system also involves heuristic resources and the algorithm of Dijkstra. In addition, fictitious networks are used in the modeling in order to obtain network topologies, enabling preliminary analysis of traffic at contingency cases. Tests conducted for several networks showed satisfactory performance of the system.

**KEYWORDS.** telecommunications networks, genetic algorithm, planning systems.

**Main area.** OR in Telecommunications and Information Systems.

## 1. Introdução

Com a privatização do setor de telecomunicações no Brasil, o mesmo apresentou forte crescimento a partir de 1998. Para atender o aumento da demanda por serviços de telecomunicações, as concessionárias do serviço passaram a necessitar de estudos de planejamento de suas redes. Além disso, precisaram realizar o dimensionamento da infraestrutura necessária às acomodações físicas para instalação e operação dos equipamentos responsáveis por prover a conexão entre vários tipos de redes, serviços, *Internet* e interconexão com outras operadoras - Bergamaschi (2001). Para que o planejamento dessas redes seja atingindo adequadamente é necessário: acessibilidade, ou a capacidade de fornecer os serviços comutados conforme as demandas; transparência do setor operacional com o setor de engenharia; e principalmente, a viabilidade e o retorno econômico do investimento. Estabelecer e atender às demandas desejadas são requisitos que têm vários aspectos. Dentre as responsabilidades da operadora da rede, o requisito principal é a capacidade de estabelecer uma conexão bem-sucedida. Para este requisito, o próprio equipamento de comutação é somente um de vários fatores importantes. Se a capacidade de comutação estiver subdimensionada resultará em congestionamento na rede, significando que o planejamento da rede está inadequado. Caso essa rede seja submetida a falhas internas ou externas - Heegaard e Trivedi (2009), a arquitetura da rede deve atender de forma satisfatória a comutação dos circuitos afetados, minimizando perdas que possam impactar nos chamados *Service Level Agreement* (SLA), ou níveis de serviço contratados, definidos entre clientes e operadoras.

Neste trabalho, é apresentado um sistema computacional para a definição de estratégias para planejamento e recomposição de redes. As estratégias são obtidas através de um sistema computacional que envolve um algoritmo genético, recursos heurísticos e o algoritmo de Dijkstra. Além disto, redes fictícias são usadas na modelagem para obtenção de topologias de rede, possibilitando a análise prévia do tráfego frente à incidência de falhas. O artigo sintetiza o desenvolvimento existente em Barreto (2011). Especificamente, estuda-se o problema de planejamento referente à constituição de topologias de redes de transporte do tipo *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH), com arquitetura *Automatically Switched Optical Network* (ASON), possibilitando diversos tipos de topologias, dedicadas ao estabelecimento da demanda, conforme SLAs previamente comercializados. O problema de recomposição de redes frente à ocorrência de falhas nestas mesmas redes também é abordado. Após esta introdução, a seção 2 apresenta a definição do problema enfocado. A seção 3 é dedicada à descrição do sistema desenvolvido, considerando os aspectos de planejamento e recomposição de redes. Na seção 4 são apresentados os testes realizados e os resultados obtidos. As considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros concluem o trabalho na seção 5.

## 2. Problema enfocado

Com o crescimento da demanda do tráfego impulsionado pela comercialização e utilização dos recursos de acesso a *Internet* por banda larga móvel ou fixa, telefonia celular e serviços de dados para transmissão de mídias em tempo real, tais como: operações bancárias, financeiras ofertados pelas empresas de telecomunicações, as operadoras necessitam implementar mecanismos que agreguem confiabilidade e possibilitem o estudo da sobrevivência da rede. A sobrevivência da rede é a capacidade do sistema fornecer continuamente os serviços em conformidade com os requisitos indicados na presença de falhas e outros eventos indesejáveis conforme Heegaard e Trivedi (2009). O sistema desenvolvido neste trabalho visa planejar redes cuja sobrevivência seja garantida, seja na ocorrência de aumento da demanda seja na ocorrência de falhas prováveis em elementos das redes.

A Figura 1 a seguir mostra uma topologia de rede e, também, a ocorrência de uma falha. Na ocorrência de falha na rede, a mesma deve realizar a normalização do tráfego através do *Network Element* (NE) transmissor que está conectado ao enlace danificado, caso isto seja

possível. Na Figura 1, o próprio NE B procura estabelecer um novo caminho óptico, ABDG, para restauração da conexão ponto a ponto entre os clientes A e B.

De acordo com López-Pastor (2007), os problemas que envolvem projeto e capacidade de sobrevivência das redes de telecomunicações são NP-completos. Assim, para resolver o problema de planejamento de redes, uma abordagem metaheurística foi adotada com a construção de um algoritmo genético. A proposta visa qualificar os resultados obtidos com o cálculo do caminho mínimo (algoritmo de Dijkstra) usando diferentes parâmetros de interesse na função objetivo e também para facilitar a síntese de redes com a possibilidade de restauração (sobrevivência), quando da ocorrência de falhas simples ou múltiplas. O sistema desenvolvido está descrito na próxima seção.

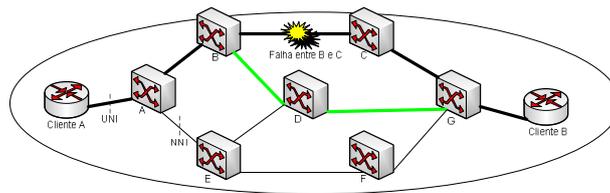


Figura 1 ó Topologia de rede com presença de falha

### 3. Sistema proposto

A Figura 2 mostra a arquitetura do sistema desenvolvido. A estratégia principal para síntese de redes é composta por outras duas estratégias, referentes aos blocos funcionais de planejamento e recomposição, que serão descritas a seguir. Para a modelagem é usada a teoria de Grafos, descrita em Goldberg et al. (2000). Assim, a topologia de rede é representada por vértices e arestas sendo que as estações são representadas pelos vértices e as interligações (enlaces ou links) entre as estações por arestas. O tratamento cartesiano para cálculo das distâncias entre todas as estações é o mesmo usado por Gen (2005) e Routray (2007).

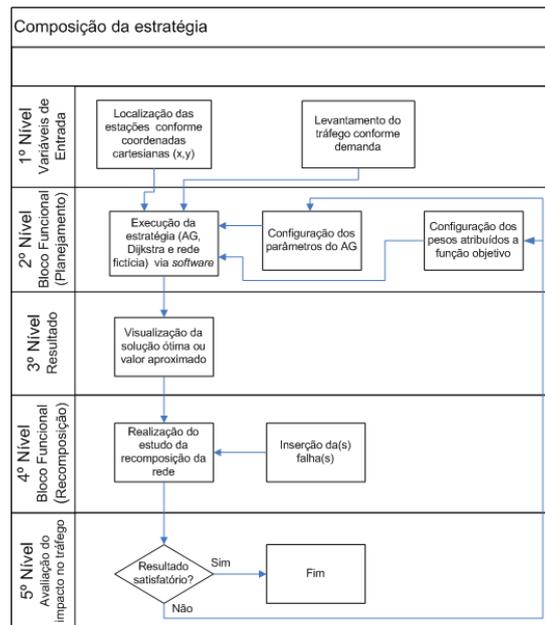


Figura 2 ó Arquitetura do sistema proposto

#### 3.1 Estratégia para planejamento

A Figura 3 detalha o bloco funcional para planejamento das redes, o segundo nível do sistema proposto. Este bloco tem como objetivo encontrar a solução ótima, ou valor aproximado desta, fazendo uso da capacidade evolutiva dos indivíduos mais aptos. Para execução do processo evolucionário é necessária a codificação do problema, possibilitando a manipulação genética em um conjunto de soluções denominado de população. Essa população, inicialmente aleatória, é formada por cromossomos que são responsáveis pela representação da solução, e seus genes representam as variáveis do problema, possibilitando a medida de aptidão de um indivíduo, denominada de *fitness*, na busca do melhor indivíduo, ou seja, a solução do problema. Com o intuito de melhorar a solução medida pelo valor da função objetivo, são definidas regras que permitem a manipulação dos cromossomos pelos seguintes operadores genéticos: *seleção*, responsável pela escolha dos indivíduos mais aptos; *crossover*, responsável pelo cruzamento ou combinação dos cromossomos pais e a *mutação*, responsável por alterações dos possíveis estados de um atributo do indivíduo diretamente no *locus* dos cromossomos filhos gerados. Além do critério de parada, possibilitando o número máximo de gerações.

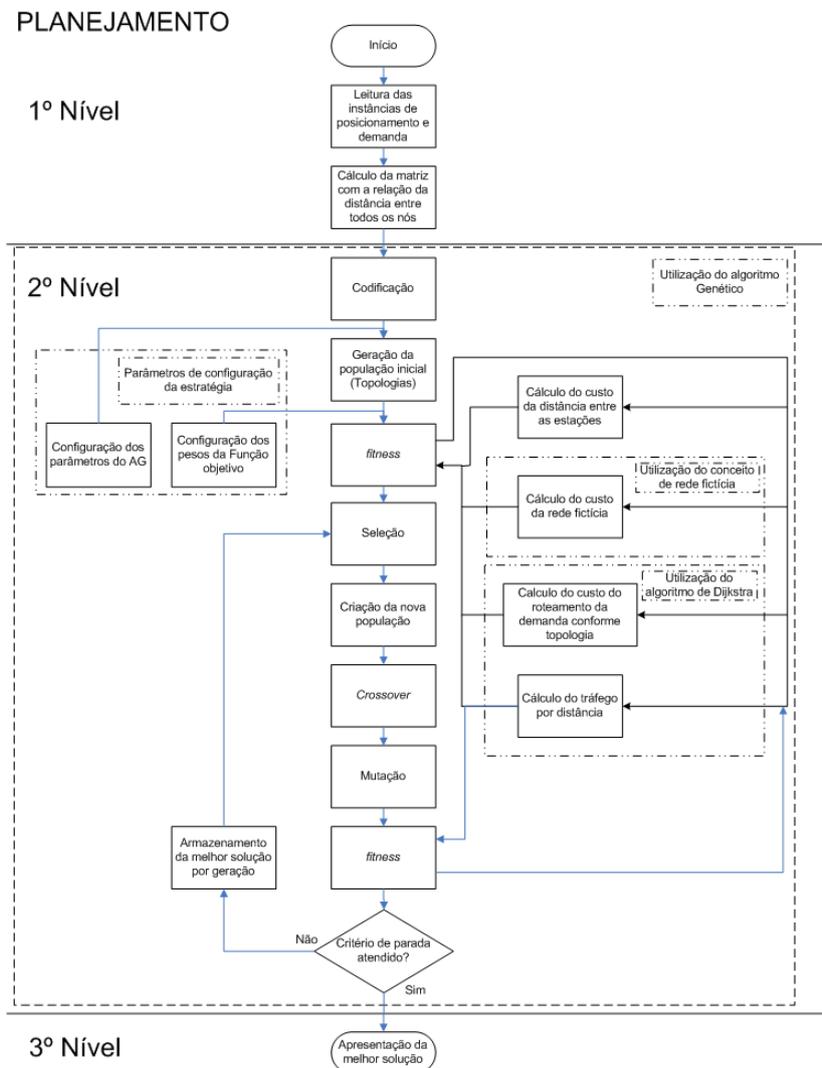


Figura 3 - Detalhamento do bloco de planejamento

Neste trabalho a busca pela solução ótima está associada à minimização de custos. Os custos envolvidos são: (i) a obtenção da distância total entre todas as estações; (ii) o custo formado pela rede fictícia; (iii) o roteamento da demanda pela topologia em avaliação; (iv) o

tráfego por distância de cada enlace. A função objetivo é da forma:

$$FO = \sum_{i=1}^4 PiFi \quad (1)$$

Em que  $Pi$  é o peso associado a função  $Fi$ .

O primeiro componente da função objetivo é o cálculo do custo total da distância entre as estações:

$$F1 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} Q_{ij} \quad (2)$$

onde:  $d_{ij}$  representa a distância entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $Q$  representa o cromossomo, ou seja, a topologia em avaliação;  $Q_{ij} = 1$ , se o valor do gene é 1; caso contrário  $Q_{ij} = 0$ .

O segundo componente da função objetivo aplica o conceito de rede fictícia, tornando funcional qualquer procedimento que envolva operações matemáticas com matrizes. Esta técnica, proposta para expansão de sistemas elétricos por Monticeli et al (1982) vem sendo usada em diversos métodos de planejamento e recomposição, tais como Canto dos Santos e Garcia (2004) e Piqueira (2008). O objetivo é resolver o problema de topologias que apresentam estações ilhadas ou desconexas à rede, na etapa do planejamento. Desta forma, o custo da rede fictícia é calculado pelo somatório do estado presente no gene do cromossomo em avaliação:

$$F2 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n RF_{ij} Q_{ij} \quad (3)$$

Onde:  $RF_{ij}$  é o valor de referência para realização de cálculos (Por exemplo:  $1 \times 10^6$ );  $Q$  representa o cromossomo, ou seja, a topologia em avaliação;  $Q_{ij} = 1$ , se o valor do gene é 0; caso contrário  $Q_{ij} = 0$ .

O terceiro componente da função objetivo é o somatório do custo do roteamento de cada circuito pela topologia em avaliação sobre a quantidade de circuitos demandados. Inicialmente, é realizado o roteamento a partir da estação de origem até a estação destino, avaliando o menor percurso com auxílio do algoritmo de Dijkstra e simulando o comportamento do roteamento, tal como no trabalho de Vasseur et al. (2004):

$$F3 = \frac{\sum \text{Custo\_do\_roteamento\_por\_circuito}}{\text{Quantidade\_de\_circuitos\_demandados}} \quad (4)$$

O quarto componente da função objetivo é responsável pela avaliação do tráfego, através do Algoritmo de Dijkstra, pela distância do link em avaliação com o objetivo de restringir, caso necessário, a capacidade máxima de tráfego por link:

$$F4 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{T_{ij}}{d_{ij}} \cdot Q_{ij} \quad (5)$$

onde:  $T_{ij}$  representa o tráfego entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $d_{ij}$  representa a distância entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $Q$  representa o cromossomo, ou seja, a topologia em avaliação;  $Q_{ij} = 1$ , se o valor do gene é 1; caso contrário  $Q_{ij} = 0$ .

### 3.2 Estratégia para estudos de recomposição

A Figura 4 detalha o bloco funcional para estudos de recomposição das redes, o quarto nível do sistema proposto. Conforme visto, já no bloco de planejamento é utilizado o conceito de rede fictícia, visando manter a conectividade da rede projetada, em qualquer situação. Com a topologia proposta no bloco funcional do planejamento e a inserção da(s) falha(s) na rede, para cada circuito demandado é realizada uma nova avaliação do percurso pelo algoritmo. O *link*

responsável pela conexão entre as estações em análise pode ter seu valor da distância alterado pelo valor da rede fictícia, ocasionando o aumento do custo da distância no percurso, caso a estação não possua *links* com outras estações. Caso a estação possua conexões com outras estações o algoritmo realizará nova avaliação do menor caminho entre as estações origem e destino. Desta forma, simulando o comportamento de um novo roteamento do circuito.

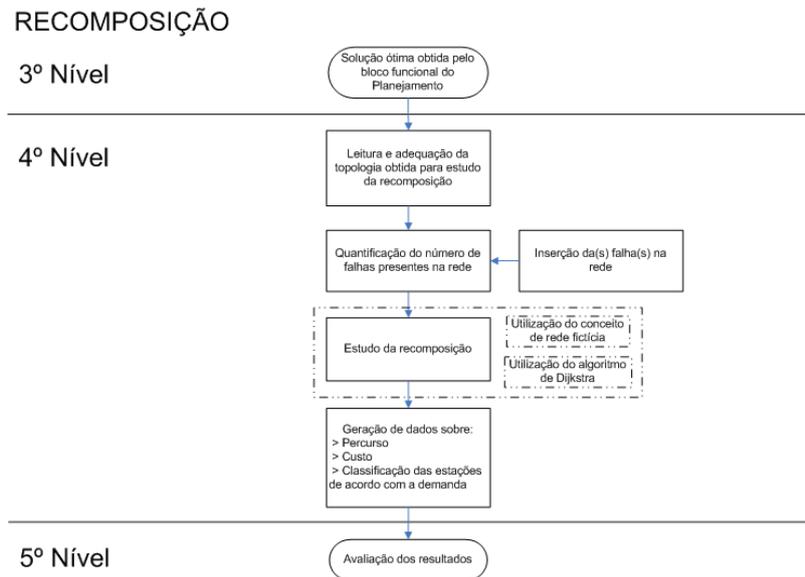


Figura 4 - Detalhamento do bloco de estudo da recomposição

#### 4. Testes e resultados

Esta seção apresenta os testes realizados para avaliar o desempenho do sistema proposto bem como os resultados obtidos. Para realização das simulações foram utilizadas duas redes, sendo a primeira composta por um conjunto de 11 vértices com demanda de 22 circuitos apresentada por Pióro e Medhi (2004) possibilitando  $235,79 \times 10^6$  possibilidades, e a segunda rede composta de 27 vértices e demanda de 45 circuitos apresentada por Piqueira (2008) possibilitando  $6,08 \times 10^{35}$  combinações. Esta rede de 27 vértices é uma rede real, denominada de *backbone*, presente em uma empresa brasileira de telecomunicações. As possibilidades foram calculadas através da fórmula apresentada por Ferreira (2000) para redes SDH.

##### 4.1. Resultados de planejamento

Para a rede de 11 vértices foram realizados 2 conjuntos de simulações. No primeiro conjunto foram realizadas 35 avaliações prevendo a alternância da população inicial, a variação da taxa de seleção (elitismo) e a variação do critério de parada foi através do número máximo de gerações fixado em: 20 avaliações com 500 gerações, 5 avaliações com 750 gerações, 5 avaliações com 1500 gerações e 5 avaliações com 3000 gerações. E, principalmente, com a atribuição de pesos na referente à função objetivo com os valores de 0,6; 0,01; 0,2 e 0,19 para os pesos P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Neste 1º conjunto de simulações a taxa de mutação foi fixada em 1% e o *crossover* em apenas um ponto de corte com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo.

Para as simulações com critério de parada em 500 gerações o valor encontrado da solução ótima foi de 5364,46 unidades sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 21ª geração com população inicial de 250 indivíduos e com taxa de seleção em 10%. Já a 20ª simulação obteve a solução ótima na 72ª geração com população inicial de 100 indivíduos e com taxa de seleção de 50%. Os cinco melhores resultados foram obtidos com população inicial entre 100 a 250 indivíduos e com taxa de seleção entre 10% a 20% na 21ª a 30ª geração. Para as

simulações com critério de parada em 750 gerações o valor da solução ótima obtido foi de 5364,46 unidades de distância, sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 28ª geração com população inicial de 200 indivíduos e com taxa de seleção em 30%. Já na 5ª simulação obteve-se a solução ótima na 48ª geração com população inicial de 50 indivíduos e com taxa de seleção de 30%. As simulações com critério de parada em 1500 gerações o valor da solução ótima obtido foi de 5364,46 unidades de distância, sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 22ª geração com população inicial de 200 indivíduos e com taxa de seleção em 30%. Já a 5ª simulação obteve a solução ótima na 63ª geração com população inicial de 50 indivíduos e com taxa de seleção de 30%. E para as simulações com critério de parada em 3000 gerações, o valor da solução ótima obtido foi de 5364,46 unidades de distância, sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 29ª geração com população inicial de 150 indivíduos e com taxa de seleção em 30%. Já a 5ª simulação obteve a solução ótima na 44ª geração com população inicial de 50 indivíduos e com taxa de seleção de 30%.

No 2º conjunto de simulações, os parâmetros dos pesos P1, P2, P3 e P4 foram alterados para: 0,8; 0,008; 1 e 1, respectivamente e a variação da taxa de mutação em 20%, 50% e 70%. Na Tabela 1 são apresentadas as configurações e os valores obtidos.

Tabela 1 ó Valores obtidos para as 6 simulações da rede de 11 vértices

Parâmetros de simulação	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
População inicial	100	100	100	100	100	100
Elitismo (%)	30	50	30	50	30	50
Taxa de mutação (%)	20	20	50	50	70	70
Critério de parada (gerações)	200	200	200	200	200	200
Custo	5050,3092	5050,3092	5050,3092	5050,7862	5058,4573	5054,5970
Geração com o melhor resultado	158	109	28	145	27	47

Como o valor da solução ótima está associado à topologia de rede, na Figura 5 é apresentada a proposta de topologia determinada pelo bloco funcional do planejamento para cada simulação.

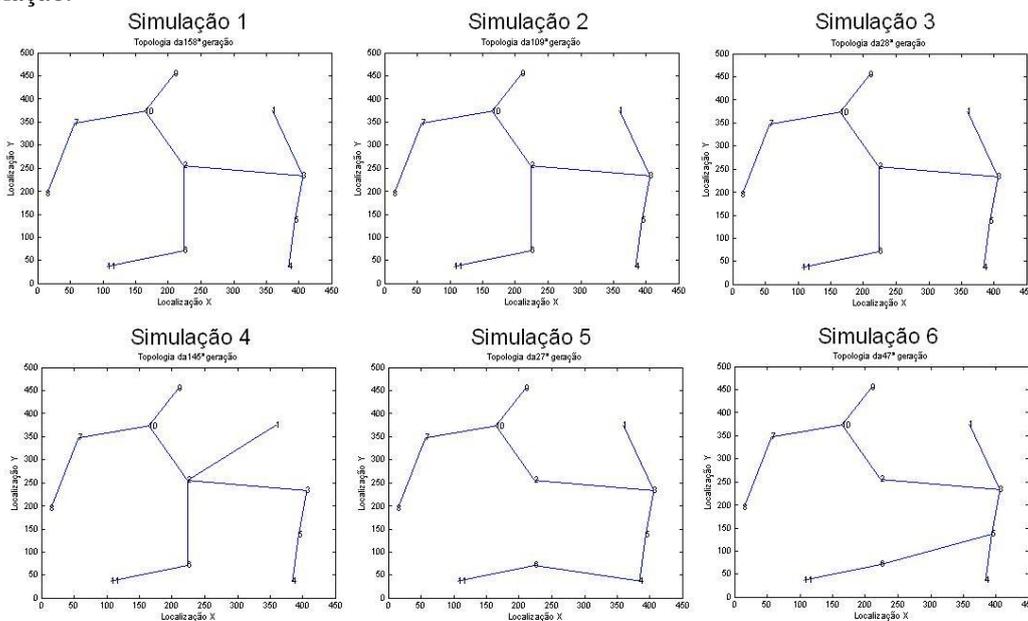


Figura 5 - Representação gráfica das topologias obtidas para a rede de 11 vértices

Com o objetivo de avaliar o desempenho da estratégia para a rede composta por 27 vértices foram realizadas 6 simulações prevendo a alteração da taxa de mutação em 20%, 50% e 70% e atribuindo os valores de 0,8, 0,0003, 1 e 1 aos pesos P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores obtidos para as 6 simulações da rede 27 vértices

Parâmetros de simulação	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
População inicial	100	100	100	100	100	100
Elitismo (%)	30	50	30	50	30	50
Taxa de mutação (%)	20	20	50	50	70	70
Critério de parada (gerações)	200	200	200	200	200	200
Custo	1295,9370	1327,8578	1287,0960	1349,6470	1300,5554	1360,5484
Geração com o melhor resultado	197	200	200	199	198	198

Na Figura 6 são apresentadas as topologias determinadas pelo bloco funcional de planejamento para cada simulação.

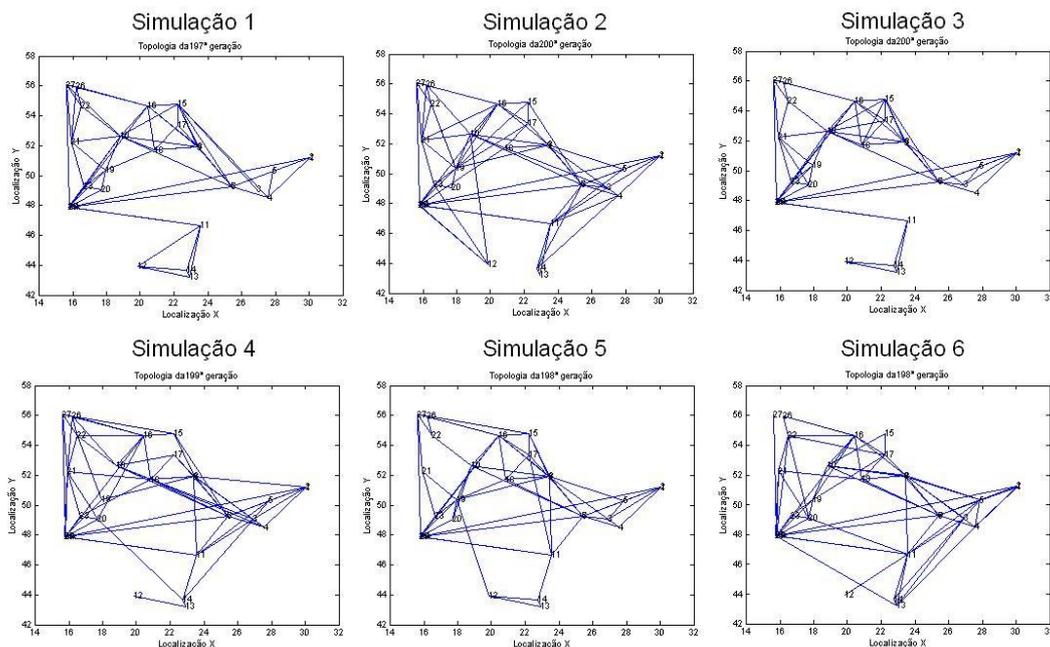


Figura 6 - Representação gráfica das topologias obtidas para a rede de 27 vértices

Para executar as 35 avaliações e o conjunto de 6 simulações com a rede de 11 vértices foram necessárias 16 horas e 19 minutos e 45 minutos de processamento, respectivamente. Já para o conjunto de 6 simulações referentes a rede de 27 vértices foram necessárias 3 horas de processamento, em microcomputador Dell, modelo Optiplex 360 com processador Intel Core 2 Duo E7500, clock de 2,93 GHz e 4 Gigabyte de memória RAM DDR2 com sistema operacional Windows XP e software MATLAB versão 7.8.0.347.

#### 4.2. Resultados de recomposição

Para a realização do estudo da recomposição da rede composta por 11 vértices com a incidência de 4 falhas seqüenciais, a topologia utilizada foi a que é vista na simulação 1

apresentada na Figura 5. A 1ª falha é aplicada no enlace que interliga as estações 7 e 8, ocasionando o acréscimo do custo pelo valor definido no custo da rede fictícia no 4º, 18º e 22º circuito, pois como não existem rotas alternativas a estratégia implementa o conceito da rede fictícia na matriz responsável pela conectividade da rede. Na ocorrência da 2ª falha no enlace que interliga as estações 7 e 10 ocorre a adição do custo da rede fictícia ao custo inicial no 7º, 12º, 13º, 14º, 20º e o 22º circuito, porém nos custos do 4º e o 18º circuito são adicionados novos valores do custo da rede fictícia, ou seja, o custo dobra. A ocorrência da 1ª e 2ª falha na rede também pode ser interpretada como perda total de conexão da estação 7, com o restante da rede totalizando a perda de tráfego conforme demanda em 42% ocasionados pela falha de 8 circuitos, conforme valores apresentados pela demanda. A 3ª falha presente nos enlaces que interligam as estações 6 e 11 ocasiona a falha em 11 circuitos, totalizando o impacto de 58% do tráfego e o acréscimo do custo pela rede fictícia no 12º circuito, já os custos para o 4º, 7º, 10º, 11º, 13º, 14º, 18º, 21º e 22º permanecem com os valores apresentados na 2ª falha. Na última falha aplicada no enlace que interliga as estações 2 e 3, o roteamento do 4º circuito foi afetado pela 3ª vez com o acréscimo do custo da rede fictícia e o 7º, 10º, 13º e 20º circuito são afetados pela 2ª vez consecutiva, dobrando os custos em função da incidência do custo da rede fictícia, restando apenas o 2º, 8º, 16º e 19º circuito intactos na rede. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores obtidos com a incidência das falhas na rede de 11 vértices

Circuito	Percurso					1ª Falha Enlace (7,8)	2ª Falha Enlace (7,10)	3ª Falha Enlace (6,11)	4ª Falha Enlace (2,3)	
	O	D	D	D	D					
1	1	3	2			333,8937	333,8937	333,8937	10149,5761	
2	1	3	5			246,3232	246,3232	246,3232	246,3232	
3	1	3	2	6		517,8937	517,8937	517,8937	10333,5761	
4	1	3	2	10	7	8	10578,0408	20466,7169	20466,7169	30282,3993
5	2	3					184,3177	184,3177	10000,0000	
6	5	3	2	6			465,0648	465,0648	10280,7471	
7	5	3	2	10	7		525,2118	10413,8879	10413,8879	20229,5703
8	4	5					100,4988	100,4988	100,4988	
9	4	5	3	2	10		514,3867	514,3867	10330,0690	
10	1	3	2	6	11		639,7338	639,7338	10517,8937	20333,5761
11	6	11					121,8401	121,8401	10000,0000	10000,0000
12	7	10	2	6	11		549,9871	10438,6632	20316,8232	20316,8232
13	1	3	2	10	7		578,0408	10466,7169	10466,7169	20282,3993
14	7	10	9				205,3451	10094,0213	10094,0213	10094,0213
15	3	2	10				317,1409	317,1409	10132,8232	10132,8232
16	2	10					132,8232	132,8232	132,8232	132,8232
17	4	5	3	2	10	9	608,4080	608,4080	608,4080	10424,0903
18	8	7	10				10111,3239	20000,0000	20000,0000	20000,0000
19	3	5	4				197,2458	197,2458	197,2458	197,2458
20	3	2	10	7			428,4647	10317,1409	10317,1409	20132,8232
21	9	10	2	6	11		532,6845	532,6845	10410,8445	10410,8445
22	7	8					10000,0000	10000,0000	10000,0000	10000,0000

Com o objetivo de realizar o estudo da recomposição para a rede de 27 vértices foram feitos 3 testes com a topologia vista na simulação 3 apresentada na Figura 6. No 1º teste foi realizada a escolha da estação alvo que serve de base para provocar apenas uma falha na rede e avaliar o impacto da perda de tráfego, quantidade de circuitos afetados e a visualização dos novos roteamentos, caso possível. No 2º teste é realizada a inserção de falhas em quase todos os enlaces presentes na estação alvo deixando apenas a estação com 1 enlace ativo. Como a estação possui apenas um enlace ativo, foi possível simular a perda total de comunicação da estação provocada pelos fatores internos e externos - Heegaard e Trivedi (2009). Esta seqüência de testes foi executada para estressar ao máximo a topologia de rede, visando verificar as potencialidades do sistema desenvolvido.

A estação alvo é a 6 devido à classificação da estação de acordo com prioridades estabelecidas. Esta estação possui 262 unidades de tráfego distribuídas em seus 10 enlaces, além de que as 4 maiores demandas estão presentes inicialmente no 7º circuito com 52 unidades de tráfego entre as estações 2 e 6, o 22º circuito com 42 unidades de tráfego entre as estações 6 e 11

e os circuitos 15° e 23° sendo que cada um possui 31 unidades de tráfego entre as estações 4 e 6 e 6 e 24, respectivamente, totalizando em 35,37% a capacidade de demanda na rede. No 1° teste foi simulada a falha no enlace que interliga as estações 2 e 6. Após a incidência da falha, o sistema realizou a avaliação dos circuitos que utilizam como transporte a interligação entre as estações 2 e 6 sendo o 1°, 7° e 15° circuitos beneficiados com novos roteamentos, evitando assim a perda de tráfego na rede. Ou seja, o 1° circuito inicialmente utiliza o percurso 1, 6 e 2 e após a falha passa a utilizar o percurso 1, 6, 5, e 2, o 7° circuito inicialmente utiliza o percurso 2 e 6 e após a falha passa a utilizar o percurso 2, 5 e 6, e para o 15° circuito é inicialmente utilizado o percurso 4, 2, e 6 e após a falha passa a utilizar o percurso 4, 2, 5, 6. Ainda no 1° teste, outra propriedade da estratégia é a reclassificação de prioridade das estações que após a incidência da falha e com os novos roteamentos realizados na rede a estação 6 continua com prioridade máxima e a estação 5 que inicialmente não tinha prioridade passa a ter a 4ª prioridade com valor de 206 unidades de tráfego.

Como a estação 6 possui 10 enlaces, o 2° teste consiste em inserir 8 novas falhas simulando múltiplas falhas na rede entre as estações 1, 3, 4, 8, 9, 10, 11 e 24 com a estação 6 possibilitando a avaliação da demanda através da estratégia de recomposição em 13 circuitos. Para o 1° circuito já com percurso alternativo, o percurso é recalculado passando por novo roteamento alterando o percurso e o custo. O 2° circuito também tem seu percurso e custo recalculados, já para o 4° circuito, com a incidência de múltiplas falhas, o percurso inicialmente formado pelas estações 1 e 6 é recalculado formando um novo percurso com a passagem pelas estações 1, 7, 2, 5, e 6 e novo custo. O 7° e o 15° circuito não são afetados permanecendo com o mesmo percurso e custo apresentados no 1° teste. O 13° circuito inicialmente com o percurso 3, 6 e 10 é recalculado para 3, 9 e 10 e o 14° circuito é recalculado de 3, 6 e 24 para 3, 9, 16 e 24. O 18° circuito inicialmente com o percurso 6 e 1 e 7 é recalculado para 6, 5, 2 e 7, o 19° circuito de 6, 8 para 6, 5, 3 e 9, 18, o 20° circuito de 6 e 9 para 6, 5, 3, 9, o 21° circuito de 6 e 10 para 6, 5, 3, 9 e 10, o 23° circuito de 6 e 24 para 6, 5, 2 e 24. A eficiência da análise da recomposição na topologia é comprovada no novo roteamento do 22° circuito onde o percurso inicial utiliza as estações 6, 24 e 11 é recalculado para 6, 5, 3, 9, 18, 20, 25 e 11 buscando todas as possibilidades, caso existam. Com os novos valores de percursos e custos a estação com maior prioridade torna-se a 5, a estação 6 torna-se a 3ª prioridade e a estação 20, inicialmente sem prioridade, torna-se a 10ª prioridade.

No 3° teste foi inserida a falha no último enlace ativo entre as estações 5 e 6 fazendo com que a estação 6 esteja fisicamente isolada da rede proposta. O 1°, 2°, 13° e 14° circuito não apresentam perda de tráfego com o isolamento da estação 6, permanecendo com os percursos e custos apresentados pelo 2° teste. Com a utilização da rede fictícia, foi possível a avaliação do percurso e custo de todos os circuitos, ou seja, para o 4°, 7°, 15°, 19°, 20°, 21°, 22° e 23° circuito, o custo com a falha é o próprio custo da rede fictícia, e os percursos são os próprios enlaces com falha, pois apresentam o menor custo em função dos valores apresentados pelos caminhos da rede fictícia. Com o isolamento da estação 6 o impacto da perda de tráfego representa 52% do total da demanda. Em relação à reclassificação das estações, a estação torna-se a com maior prioridade, porém já está com perda total de tráfego tornando a estação 2 a 2ª maior prioridade da rede.

## 5. Considerações Finais

Com o crescimento do tráfego dos serviços de banda larga, telefonia fixa e móvel nas redes de telecomunicações, a necessidade de demandar esforços no planejamento e estudos de recomposição de redes, em especial redes de transporte, torna-se elevada. Pois, atualmente, os níveis de complexidade para atender diversas localidades com qualidade, respeitando os SLAs contratados, demandam dos departamentos de Engenharia e Operação horas de planejamento e o estudo de caso para determinar quão crítica é uma determinada situação de falha na rede projetada, provocando a mínima perda de tráfego. Para tornar possível o planejamento e o estudo da recomposição da rede, é fundamental a utilização de recursos computacionais pelos departamentos responsáveis pelos projetos e operação da rede na implementação de rede com

arquitetura ASON, como é o caso do método proposto neste trabalho.

A composição da estratégia principal foi realizada através do AG canônico, responsável pela geração das topologias, onde foi observada, inicialmente, a dificuldade de codificação do problema real em parâmetros biológicos, resultando em problemas futuros na formulação das matrizes, responsáveis pela avaliação dos nós (estações) ou dos arcos (enlaces), necessitando de transcodificação, impactando no desempenho do recurso computacional, ou seja, impactando no tempo de resposta. Outro fator importante que compõe a estratégia principal é a possibilidade de configuração dos parâmetros do AG, tais como: população inicial ( $P_i$ ), a taxa de seleção (Elitismo), critério de parada e a taxa de mutação; além da atribuição de pesos na função objetivo, possibilitando aos projetistas um maior conhecimento sobre a topologia em análise e sobre os efeitos das alterações de suas características e dos requisitos de desempenho, possibilitando um melhor conhecimento da rede e permitindo a tomada de decisões com melhores critérios. Na função objetivo, os valores responsáveis pela obtenção da solução ótima ou valor aproximado, são obtidos através do cálculo da menor distância entre as estações, do cálculo dos valores atribuídos com a utilização do conceito de rede fictícia e, principalmente, pela avaliação da demanda dos circuitos na rede e avaliação do tráfego pela distância, que foram obtidos através do algoritmo de Dijkstra, simulando a funcionalidade da rede de telecomunicações.

O sucesso da estratégia responsável pelo bloco funcional do estudo da recomposição deveu-se à utilização do conceito de rede fictícia na modelagem e solução computacional. Isto possibilitou a análise prévia do tráfego, através do roteamento dos circuitos pelo algoritmo de Dijkstra, na rede proposta pelo bloco funcional do planejamento sobre a incidência de falhas. Este foi o principal diferencial deste trabalho no tratamento de matrizes desconexas com a utilização do conceito de rede fictícia, possibilitando o tratamento matemático adequado ao estudo da recomposição e também do planejamento. O resultado foi comprovado nos testes apresentados para a rede de 27 nós.

Por fim, como trabalhos futuros, pode-se prever a continuidade do desenvolvimento da pesquisa na elaboração da estratégia de planejamento e estudo da recomposição com a implementação de outros métodos heurísticos, tais como: Busca Tabu, *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Ant Colony Optimization* (ACO), possibilitando o comparativo entre os métodos de solução. Outra possibilidade é o aperfeiçoamento do AG para um modelo híbrido, que possibilite melhorar o desempenho do algoritmo com a alteração do método de *crossover*, a atribuição de novos critérios de parada, o refinamento do cromossomo na associação da capacidade de comutação interna dos equipamentos *Add/Drop Multiplex* (ADM) ou *Digital Cross Connect* (DXC) e a adição de novas matrizes, responsáveis pela alocação dos recursos financeiros previstos nos orçamentos de *Capital Expenditures* (CAPEX) e *Operational Expenditures* (OPEX) de uma empresa de telecomunicações, nas restrições do problema, possibilitando o estudo econômico dos investimentos.

## Referências

- Barreto, M. B.**, Estratégias para planejamento e recomposição em redes de telecomunicações. *Dissertação de mestrado* ó Unisinos, Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, 2011.
- Bergamaschi, M., A.**, Planejamento de redes de transmissão SDH dividido em camadas funcionais. *Tese de doutorado* ó Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, 2001.
- Canto dos Santos, J. V., Garcia, A.** (2004), Um Método para Auxiliar Processos de Restauração de Sistemas de Potência. *Revista Controle e Automação*, Vol. 15 n° 1.
- Ferreira, M. S.**, Algoritmos de otimização para redes de Telecomunicações. *Dissertação de mestrado* ó Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Minas Gerais, 2000.
- Gen, M., Kumar, A., Kim, J., R.** (2005), Recent Network Design Techniques using Evolutionary Algorithms. *Int. J. Production Economics*, vol. 98, pag. 251-261.



- Goldbarg M., Cesar; Luna, H. Pacca.,** *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos.* Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- Heegaard P.E., Trivedi K.S.** (2009), Network survivability modeling. 53rd Computer Networks. Pages: 1215-1234 Elsevier, Março 2009.
- López-Pastor, E., T.;** (2007) Algoritmo de RWA com considerações de sobrevivência baseado em Heurísticas-Algoritmo Genético para Redes IP/WDM. *Publicação PPGENE. Tese de Doutorado ó 016/7.* Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 236p. 2007.
- Monticelli, A., Santos, JR, A., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H., Parker, B. J., Praça, J. C. G.** (1982), Iterative Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion. *IEEE Transactions on PAS*, EUA, 101(10): 3919-3925.
- Piéro, M., Medhi, D.,** *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks.* 1st ed. ELSEVIER, Rio de Janeiro, 2004.
- Piqueira, A.;** Metodologia para evolução topológica de redes ópticas de transmissão ó Implantação da Tecnologia ASON. *Publicação PPGENE. Dissertação de Mestrado ó 059/08.* Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 83p. 2008.
- Routray, S., Sherry, A. M., Reddy, B. V. R.** (2007), ATM network planning: A genetic Algorithm Approach, *Journal of Applied & Theoretical Information Technology (JATIT)*, available through EBSCO Publishing USA, Volume 3 No.4, pp 72-79.
- Vasseur, Jean-Philippe, Pickavet, M., Demeester, P.,** *Network Recovery ó Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS.* Morgan Kaufmann Series in Networking ó ELSEVIER, 2004.