

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Amaury Kruel Budri

e aprovada pela Comissão
Julgadora em 05/07/91.

Orientador

Bonatti

**ENCAMINHAMENTO DE CHAMADAS TELEFÔNICAS:
MODELAMENTO E SIMULAÇÃO.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.

Autor: Amaury Kruel Budri.

Banca Examinadora:

Ivanil (Sebastião) Bonatti¹⁹⁵¹⁻ (Orientador)

Anilton Salles Garcia

Jurandir Ribeiro Fernandes

Akebo Yamakami (Suplente)

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEPARTAMENTO DE TELEMÁTICA

JULHO de 1991

05/07/91

UNICAMP

Resumo: Este trabalho apresenta instrumentos de análise de desempenho de redes telefônicas, com o objetivo de avaliação dos seus planos de encaminhamento.

Foram desenvolvidas duas ferramentas computacionais para simulação de redes telefônicas considerando-se diferentes técnicas de encaminhamento, tais como: transbordo e repartição de carga.

SIMTRAF é um simulador de redes telefônicas baseado num modelo de simulação a eventos discretos e ANATRAF é baseado num modelo analítico. Ambos são versáteis, podendo tratar redes com qualquer tipo de configuração topológica, e computacionalmente muito eficientes.

Abstract: This work presents two telephone network performance analysis tools for call routing plan evaluation purposes considering different routing techniques like overflow and load sharing.

SIMTRAF is a telephone networks simulator based on a discrete event simulation model and ANATRAF is based on an analytical model.

Agradecimentos.

Ao meu orientador Ivanil Sebastião Bonatti que dedica a todos seus alunos e orientados um esforço e amizade muito além de seus deveres como professor.

Aos engenheiros Armando Drumond e Caio Cesar Bonilha Rodrigues com quem iniciei minha carreira nas telecomunicações como estagiário e que me orientaram e incentivaram, e a quem devo muito do conhecimento contido neste trabalho e de minha carreira como engenheiro.

Ao engenheiro Luis Augusto Aquino que chefiou o DES da ELEBRA TELECON, onde tive meu primeiro emprego como engenheiro, e que com sua sabedoria mato-grossense e sua inteligência formou uma equipe única e criou um ambiente de formação e crescimento de seus integrantes, onde pude me aprimorar e amadurecer.

Ao professor Dr. Anilton Salles Garcia membro da equipe do DES com quem trabalhei e que sempre me apoiou, e que me auxiliou na compreensão do planejamento telefônico.

Ao engenheiro Carlos Roberto Tiba, pelo seu apoio na compreensão do planejamento telefônico.

Aos engenheiros Luiz Reinaldo Solon e Marcelo de Barros da Telesp que auxiliaram no estudo de redes realistas apresentadas neste trabalho.

Aos meus colegas de ELEBRA, TELEBRÁS e UNICAMP com quem convivi nestes últimos anos. Um dos maiores sacrifícios de realizar este trabalho, por sua natureza individual, é ser privado do convívio diário de um trabalho em equipe.

À UNICAMP e à CAPES que apoiaram financeiramente este trabalho.

ÍNDICE:

1. Introdução.

2. Redes Telefônicas.

2.1. Planejamento.

2.2. Topologia e Características.

2.2.1. Elementos da Rede.

2.2.2. Caracterização das Redes Telefônicas.

2.2.3. Técnicas de Encaminhamento.

2.2.4. Encaminhamento para a Rede Nacional de Telefonia.

2.3. Modelos de Redes Telefônicas.

2.4. Avaliadores de Desempenho.

2.4.1. MALEPESTE.

2.4.2. ENSEMBLE.

2.4.3. MNM e LCM da British Telecom.

2.5. Conclusões.

3. Simulação a Eventos Discretos.

3.1. Introdução à Teoria de Simulação a Eventos Discretos.

3.1.1. Introdução.

3.1.2. Geração de Variáveis Aleatórias.

3.1.3. Análise dos Resultados.

3.2. Linguagens de Simulação.

3.2.1. Linguagem SLAM.

3.2.2. Descrição de Modelos em SLAM.

3.2.3. Modelo de Descrição de Redes Telefônicas.

3.3. Simulador de Redes Telefônicas.

3.3.1. Estrutura Funcional.

3.3.2. Aspectos Estatísticos.

3.4. Conclusões.

4. Modelo Analítico.

4.1. Modelamento.

4.1.1. Introdução.

4.1.2. Características do tráfego telefônico.

4.1.3. Modelo Markoviano.

4.1.4. Modelo Equivalente de Wilkinson.

4.1.5. Modelo de Erlang Invertido.

4.1.6. Encadeamento de Tráfego.

4.2. Modelos Analíticos para Redes.

4.3. Aspectos Computacionais.

4.4. Conclusões.

5. Análise de Redes.

5.1. Casos Elementares.

5.2. Análise de Redes Elementares.

5.2.1. - Rede com Encaminhamento Tipo Repartição de Carga.

5.2.2. - Redes com Encaminhamento Tipo Transbordo.

5.2.2.1. - Rede Quadrangular de Dois Níveis Completa.

5.2.2.2. - Rede Quadrangular de Dois Níveis Sem Tráfego
Entre Centrais Trânsito.

5.2.2.3. - Rede Triangular de Dois Níveis.

5.2.2.4. - Rede Quadrangular Sem Rota Direta Entre Trânsito
de Origem e Central de Destino.

5.2.2.5. - Rede Quadrangular Sem Rota Direta Entre Origem e
Destino.

5.3. Redes Complexas.

5.3.1. Rede de Referência.

5.3.2. Rede de Médio Porte.

5.4. Conclusões.

6. Conclusões.

7. Referências Bibliográficas.

CAPÍTULO 1. - INTRODUÇÃO.

Este trabalho contribui com subsídios técnicos e ferramentas computacionais para a abordagem de alguns aspectos do planejamento e gestão de redes telefônicas.

Historicamente tem-se utilizado nas redes telefônicas uma técnica de encaminhamento chamada transbordo. Nela, há uma rota de primeira escolha e rotas alternativas. Quando a rota de primeira escolha está inteiramente ocupada, o tráfego passa a ser direcionado para a primeira rota alternativa, e assim sucessivamente até o congestionamento da última rota alternativa. A partir de então as chamadas são bloqueadas [WILKINSON 36].

Recentemente, os equipamentos de comutação instalados na rede de telefonia passaram a incorporar a tecnologia CPA (controle por programa armazenado), que possui grande flexibilidade em relação às técnicas de encaminhamento, muito superior à encontrada em antigas tecnologias. Assim, em redes que incorporem estes equipamentos, é possível implementar, com maior facilidade, novas técnicas de encaminhamento. A técnica de repartição de carga é uma delas. Nela, o tráfego é distribuído pelas rotas de acordo com percentuais pré-estabelecidos [BONATTI 07] [DE PIERI 09].

Novas técnicas de encaminhamento têm sido sugeridas e estudadas com o intuito de melhorar o desempenho das redes telefônicas, considerando, inclusive, situações de contingência, como falha em equipamentos ou sobrecarga de tráfego. Outra facilidade incorporada em centrais modernas permite que o seu encaminhamento seja modificado ao longo do tempo, em horários pré-determinados ou mesmo de acordo com as condições de tráfego medidas em um dado período (encaminhamento

adaptativo) [ASH 03-04] [BEL 05].

Outro aspecto a ser considerado na análise de desempenho de redes é a influência da introdução de novos serviços ou facilidades. Como exemplo podemos citar as rotas bidirecionais e os serviços prestados pela rede digital de serviços integrados (RDSI). Estes novos serviços podem influir no desempenho da rede, uma vez que podem possuir um tráfego de volume significativo e perfil diferente do tráfego telefônico comum, exigindo novas características do plano de encaminhamento.

O planejamento de redes tem como objetivo minimizar o custo de implantação dos equipamentos, respeitando-se critérios de desempenho. Geralmente leva-se em consideração um plano de encaminhamento pré-estabelecido para resolver este problema. Portanto, a topologia da rede é resultado do plano escolhido. Esta abordagem é apropriada, uma vez que a otimização com o plano de encaminhamento a determinar torna-se demasiadamente complexa. Fica clara a importância de se determinar "a priori" qual o plano de encaminhamento mais adequado para uma dada rede [GARCIA 14-15] [LAGE 22] [MORENO 29].

Esta escolha não é feita apenas do ponto de vista econômico mas também do ponto de vista gerencial. Um exemplo é a determinação do número de níveis hierárquicos de uma rede. Neste caso particular um dos critérios de escolha é a qualidade das ligações telefônicas, dado que cada comutação introduz atrasos e distorções que contribuem para a degradação da qualidade do sistema.

Durante a fase de planejamento as simplificações do modelo teórico, a modularidade dos equipamentos digitais e outros fatores podem resultar numa rede cujo plano de encaminhamento ótimo não seja aquele adotado inicialmente.

O mesmo pode ocorrer durante a operação da rede, causado por

eventos que perturbem a operação do sistema como, por exemplo, diferenças entre o tráfego real e o tráfego previsto no planejamento, modificações no perfil de tráfego e atraso na implantação de equipamentos.

Nestes casos, uma pós-otimização dos parâmetros de encaminhamento, sem a necessidade de modificação da topologia de rede, pode contribuir para uma melhoria no desempenho do sistema.

Com o objetivo do desenvolvimento de ferramentas computacionais para a análise de redes telefônicas são consideradas neste trabalho as técnicas de transbordo e repartição de cargas. As ferramentas software desenvolvidas são um simulador de redes telefônicas (SIMTRAF) e um programa para cálculo de probabilidades de bloqueio (ANATRAF).

No capítulo 2 são abordados alguns aspectos do planejamento de redes telefônicas e apresentada uma descrição dos seus elementos, dos seus aspectos topológicos e de seus planos de encaminhamento. Uma definição formal para os elementos componentes das redes telefônicas e alguns avaliadores de desempenho de redes telefônicas encontrados na literatura também são apresentados neste capítulo.

No capítulo 3 é apresentado o aplicativo computacional para a simulação de redes telefônicas SIMTRAF, baseado num modelo de simulação a eventos discretos. São discutidos os seus aspectos estatísticos para a análise dos resultados obtidos e é feita uma comparação entre o SIMTRAF e uma simulação utilizando um modelo desenvolvido em linguagem SLAM [PRITSKER 31].

No capítulo 4 são apresentados os principais métodos de modelamento analítico de redes telefônicas encontrados na literatura. A partir do modelo de Erlang invertido [BONATTI 07] [LE GALL 24] foi desenvolvido o aplicativo computacional ANATRAF para avaliação de redes telefônicas.

No capítulo 5 são analisadas algumas redes telefônicas com os aplicativos SIMTRAF e ANATRAF. Estas simulações permitiram avaliar a precisão do modelo analítico e o efeito das simplificações envolvidas.

No capítulo 6, as principais conclusões deste trabalho são resumidamente apresentadas.

CAPÍTULO 2. - REDES TELEFÔNICAS.

Alguns aspectos gerais sobre redes telefônicas e seu planejamento e uma definição formal sobre seus elementos componentes são apresentados neste capítulo. Algumas ferramentas de análise de redes telefônicas descritas na literatura são apresentadas e discutidas.

2.1. Planejamento.

Planejamento pode ser definido como sendo o conjunto das atividades que precedem a construção ou manufatura de algum produto. O objetivo do planejamento é formular um modelo que permita avaliar as características do produto antes de sua construção. O produto deve atender a requisitos, que constituem sua especificação [TOZZI 35].

As atividades de planejamento podem ser classificadas em dois grupos genéricos: Síntese e análise. As atividades de síntese são aquelas que a partir do conhecimento disponível procuram criar um modelo do produto. As atividades de análise são aquelas que examinam os resultados das atividades de síntese, permitindo sua avaliação. Em geral as atividades de síntese apresentam maiores dificuldades do que as atividades de análise.

Freqüentemente as regras utilizadas nas etapas de síntese sofrem simplificações e aproximações com o objetivo de contornar estas dificuldades. As etapas de análise sempre utilizam regras reconhecidamente válidas, com simplificações e aproximações muito menores.

O diagrama da Fig. 2.1.1. representa o processo de planejamento. O processo de síntese é geralmente dividido em subprojetos para simplificá-lo e permitir sua divisão entre diversas equipes de

trabalho. Cada subprojeto possui uma malha de realimentação entre seus processos internos de síntese e análise. Esta interação pode ocorrer internamente ou entre os diversos subprojetos. A partir do modelo é feita uma análise global que permitirá a avaliação do produto.

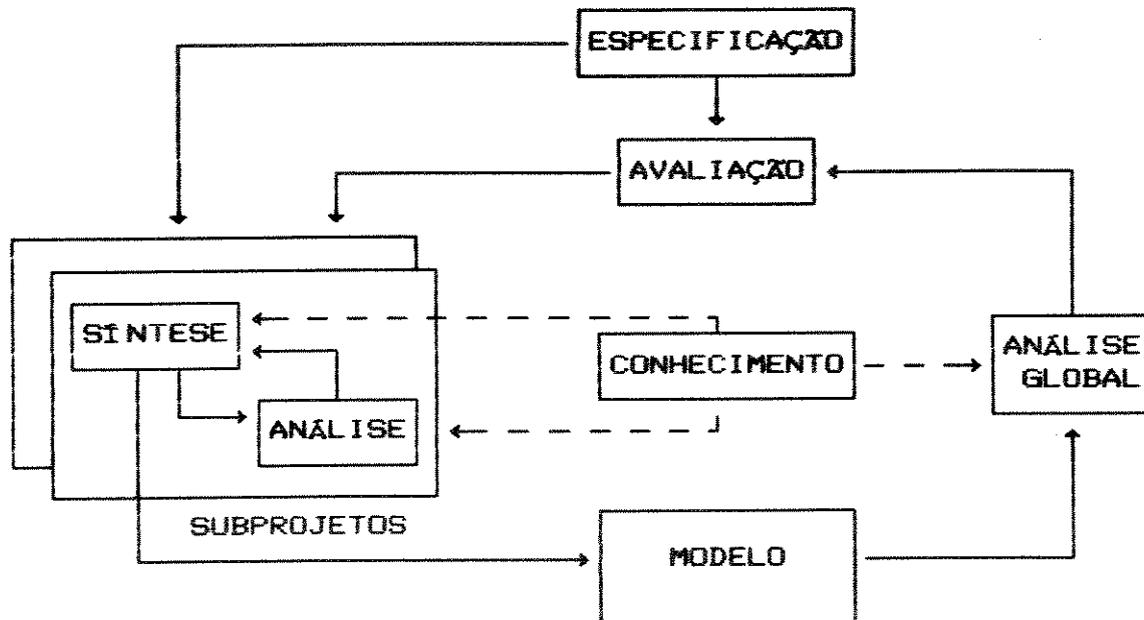


Figura 2.1.1. - Diagrama em blocos do processo de planejamento.

O planejamento de redes telefônicas se enquadra neste diagrama de processo de planejamento. O produto a ser modelado é a rede telefônica. As especificações a serem cumpridas são o grau de qualidade de serviço da rede, os planos de transmissão, sincronismo e encaminhamento, o custo mínimo de implantação, etc.

A minimização do custo da rede é o principal problema a ser considerado na fase de síntese. O problema global é dividido em subprojetos, tais como localização de centrais, entroncamento, roteamento, etc.

Dada a complexidade das tarefas de planejamento de redes telefônicas, torna-se necessária a utilização de ferramentas computacionais, caracterizando-se assim um projeto auxiliado por computador (PAC).

Um sistema PAC deve possuir as seguintes características gerais:

- Capacidade de entrada e saída gráficas;
- Capacidade formal de descrição de objetos e métodos de projeto que permita a criação do modelo do produto;
- Banco de dados que permita a integração das várias etapas de planejamento;
- Uma estrutura de diálogo homem-máquina que facilite a utilização do sistema pelo usuário.

Além destas características gerais pode-se acrescentar, para planejamento telefônico, a necessidade de grande capacidade de memória devido ao enorme volume de dados envolvidos.

O planejamento de redes telefônicas consiste em determinar quando e onde devem ser instalados os componentes da rede, de forma a alcançar os seguintes objetivos:

Atender aos requisitos mínimos de qualidade de serviço.

Atender a demanda gerada pelos novos usuários.

Minimizar o custo de implantação e operação.

Compatibilizar este custo ao capital e à mão de obra disponíveis.

Devido a sua grande complexidade, o planejamento de redes telefônicas exige a decomposição do problema em partes interrelacionadas, mas que possam ser tratadas separadamente. É feita uma decomposição do problema no tempo e no espaço [FRANÇA 13].

A decomposição no tempo é feita fixando-se um horizonte de planejamento, que deve ser escolhido de acordo com a previsão de alterações tecnológicas da rede. Este período (10 a 20 anos) é subdividido em estágios de curto e médio prazo a partir do ano base (ano inicial) até atingir o ano horizonte.

A decomposição no espaço consiste em planejar separadamente segmentos da rede. Nas redes locais, a decomposição no espaço é feita planejando-se em um primeiro passo a localização das centrais locais e as redes primária e secundária. As redes primária e secundária constituem as ligações dos terminais de assinante aos equipamentos de comutação.

A rede primária normalmente é subterrânea e interliga as centrais de comutação e a rede secundária.

A rede secundária, normalmente constituída de cabos aéreos, interliga a rede primária e os terminais de assinante. As redes primária e secundária influem majoritariamente no custo total de uma rede telefônica. Assim sendo, o primeiro passo para planejamento de uma rede telefônica local é determinar a instalação de novas centrais ou a ampliação das já existentes, de forma a minimizar o custo de ligação entre as centrais e seus assinantes e minimizar o custo de implantação das novas centrais.

Para redes interurbanas, o primeiro passo também é determinar a instalação das centrais de trânsito. No entanto, neste caso sua localização visa minimizar o custo de ligação entre a central trânsito e as centrais locais a ela subordinadas. O segundo passo, tanto para redes locais como para redes interurbanas, é determinar como as várias centrais estarão interligadas e como as chamadas serão encaminhadas pela rede. Para este segundo passo existe uma abordagem clássica e uma abordagem moderna [MORENO 29] [GARCIA 14-15] [LAGE 22].

A abordagem clássica subdivide o problema em três etapas de planejamento que tratam do encaminhamento, entroncamento e roteamento.

A etapa de encaminhamento consiste em determinar o trajeto para cada tipo de chamada na rede.

A etapa de entroncamento tem como objetivo dimensionar o número de canais interligando cada central.

A etapa de roteamento determina os meios de transmissão e sua localização na rede física.

Esta metodologia foi criada para o dimensionamento de redes com tecnologia de comutação eletromecânica e tecnologia de transmissão analógica. Neste cenário as centrais eletromecânicas não possuem flexibilidade quanto ao encaminhamento. Usualmente estas centrais utilizam a técnica de transbordo com uma ou duas rotas alternativas. O custo de comutação para centrais tandem ou trânsito é elevado. Como consequência o encaminhamento é bastante conservador e do tipo hierárquico. A transmissão por sua vez consiste em cabos de pares para curtas distâncias ou rádio para longas distâncias. Assim, para uma dada rede é possível prever com razoável precisão os custos de transmissão a utilizar na fase de entroncamento. Conseqüentemente, entroncamento e roteamento podem ser tratados separadamente [RAPP 32-33].

Atualmente, os novos equipamentos de comutação e transmissão implantados utilizam tecnologia digital. Juntamente com a introdução desta nova tecnologia, surgiu a utilização de satélite para chamadas nacionais, criando assim um novo cenário. As centrais tiveram seu tamanho físico reduzido, não exigindo grandes prédios para sua instalação, em comparação às centrais eletromecânicas. O custo para implementação da função tandem ou trânsito nestas centrais foi também diminuído. As possibilidades de encaminhamento foram ampliadas e sofisticadas com a introdução de novas técnicas de encaminhamento e facilidades como por exemplo o encaminhamento dinâmico.

No cenário digital os equipamentos de transmissão oferecem uma ampla escolha entre rádio, cabos PCM ou fibra óptica. Cada um destes

meios suporta diversas hierarquias (30, 120, 480 e 1920 canais). Cada combinação meio e hierarquia pode resultar em custos muito diferentes e, conseqüentemente, o custo por canal é não linear e é modular em relação ao número de canais utilizados. Torna-se difícil determinar o custo para cálculo do entroncamento sem levar em conta o roteamento, que por sua vez depende dos resultados do entroncamento. Desta forma as etapas de encaminhamento, roteamento e entroncamento ganham uma maior interdependência, tornando menos eficaz a abordagem clássica de planejamento de redes.

Este impacto, causado pela tecnologia digital, tem maiores conseqüências nas redes locais. As redes interurbanas são menos afetadas porque neste caso a escolha entre vários meios de transmissão é mais limitada e o encaminhamento é mais rígido. A escolha dos meios de transmissão para redes interurbanas depende preponderantemente do volume de tráfego, da distância a ser percorrida e da localização da central. Isto permite que esta escolha seja feita anteriormente às etapas de encaminhamento, entroncamento e roteamento, diminuindo a interdependência entre elas.

Atualmente estão sendo propostas novas metodologias, mais adequadas às novas características das redes telefônicas, que procuram resolver as etapas de planejamento clássicas de forma mais integrada, dando origem a uma abordagem moderna do problema [LAGE 22].

2.2. Topologia e Características.

Uma rede telefônica é um sistema composto por equipamentos de transmissão e comutação que permitem o estabelecimento de uma comunicação de voz entre dois terminais. Dada sua complexidade, o sistema tradicionalmente é dividido, do ponto de vista físico, em três partes, com a finalidade de permitir uma melhor compreensão de seu

funcionamento e facilitar seu planejamento e operação: Redes de assinantes, comutação e transmissão.

A rede de assinantes é aquela que vai dos terminais até a central telefônica local. É basicamente composta dos terminais de assinante, telefones públicos, cabos aéreos e subterrâneos, rádios mono-canal, etc.

A comutação e transmissão são compostas, respectivamente, pelos equipamentos de comutação, que basicamente são as centrais telefônicas de comutação, e pelos equipamentos de transmissão constituídos pelos equipamentos de rádio, satélite, multiplexadores digitais, fibras ópticas, que interligam os equipamentos de comutação. Em geral, o estudo do encaminhamento de chamadas telefônicas leva em consideração apenas a estrutura de comutação da rede.

É interessante observar que esta é uma visão tradicional das redes telefônicas. As próprias administrações telefônicas tem seu organograma vinculado a esta estrutura. No entanto o avanço tecnológico coloca esta forma de divisão em sérias dificuldades. Os equipamentos de comutação de tecnologia temporal incorporam parte das funções da transmissão. Na rede digital de serviços integrados e na telefonia celular, a rede de assinantes se confunde com a comutação e com a própria transmissão.

Do ponto de vista topológico a rede telefônica pode ser subdividida em duas estruturas sobrepostas, que são chamadas de rede física e rede lógica ou funcional. A rede física é composta pelos equipamentos de comutação e transmissão e as ligações físicas entre eles. A rede lógica descreve os equipamentos de comutação, as ligações lógicas entre eles e as regras de encaminhamento das chamadas. Usualmente o estudo de bloqueio em redes telefônicas se restringe à rede lógica. Este estudo requer apenas o conhecimento do plano de

encaminhamento, o número de circuitos disponíveis em cada rota e a matriz de tráfego da rede. Seu objetivo é determinar as probabilidades de bloqueio nas rotas e ponto a ponto. Eventualmente no estudo de situações de contingência são utilizados dados sobre a rede física para determinação dos modos de falha para a rede estudada.

2.2.1. Elementos da Rede.

A seguir é apresentada uma descrição formal dos elementos de uma rede telefônica. Esta formalização objetiva definir claramente os componentes de uma rede e identificar uma base de dados capaz de representá-la de forma única, tanto do ponto de vista de transmissão como de comutação.

1. **Nó Físico:** Qualquer ponto de conexão na rede física. Os nós físicos podem ser estações, portas de hierarquia PCM ou ponto de passagem ou de distribuição.

2. **Estação ou Centro de Fios:** É o nó físico que contém pelo menos uma central de comutação ou estágio de linha remoto

3. **Porta de Hierarquia:** É o nó físico onde há mudança de hierarquia de transmissão PCM.

4. **Ponto de Passagem ou de Distribuição:** É um nó físico onde há uma mudança das características físicas dos meios de transmissão. Pode ser, por exemplo, um nó onde um cabo de 100 pares se divide em dois cabos de 50 pares.

5. **Arco Físico:** Qualquer ligação entre nós físicos. Pode ser uma galeria, um enlace de rádio, etc.

6. Meio de Transmissão - É a ligação entre dois nós físicos com continuidade de empacotamento físico. Pode ser cabo de pares, fibra monomodo, etc.

7. Enlace: É a ligação entre dois nós físicos, que contém os equipamentos terminais do enlace, com continuidade de tecnologia de transmissão. Pode ser enlace PCM 30 canais, enlace óptico 34 Mb/s, etc.

8. Rota Física: É o conjunto de canais que interligam duas centrais e que percorrem os mesmos enlaces.

9. Rota ou Rota Lógica: É o conjunto de canais que interligam duas centrais e que não podem ser diferenciados para propósitos de encaminhamento de tráfego.

10. Enlace Lógico ou Caminho: É um dos possíveis conjuntos de rotas lógicas utilizados por um dado tráfego origem-destino para percorrer a rede telefônica.

11. Plano de Encaminhamento: Conjunto de regras que estabelece a forma pela qual as chamadas devem ser escoadas em uma rede telefônica.

12. Grafo de Conexão Física: É o conjunto de dados que descreve como os nós físicos estão interligados, composto por:

Nós Físicos

Arcos Físicos

13. **Entroncamento:** É o conjunto de dados que descreve como são interligadas logicamente as centrais, composto por:

Centrais

Rotas lógicas

14. **Roteamento:** É o conjunto de dados que descreve os meios de transmissão, composto por:

Nós Físicos

Portas de Hierarquia

Pontos de passagem ou distribuição

Arcos

Meios de Transmissão

Enlaces

Rotas Físicas

15. **Encaminhamento:** É o conjunto de dados que descreve a comutação quanto a sua estrutura lógica, composto por:

Centrais

Rotas

Plano de Encaminhamento

A figura 2.2.1. apresenta uma rede telefônica hipotética para a exemplificação dos elementos da rede. A rede conta com quatro nós físicos denominados Castelo, Vila Nova, Centro e Barão Geraldo. Os nós Castelo, Centro e Barão Geraldo são estações e portas de hierarquia.

O nó Castelo possui a central 21, um equipamento multiplexador digital de 120 canais, ligado a um rádio digital de 480 canais. A central 21 é interligada ao multiplexador por meio de dois enlaces digitais de 30 canais. O nó Barão Geraldo possui a central 31, dois

equipamentos multiplexadores digitais de 120 canais e um rádio de 480 canais. O nó Centro possui as centrais 41 e 42 além de um multiplexador de 120 canais.

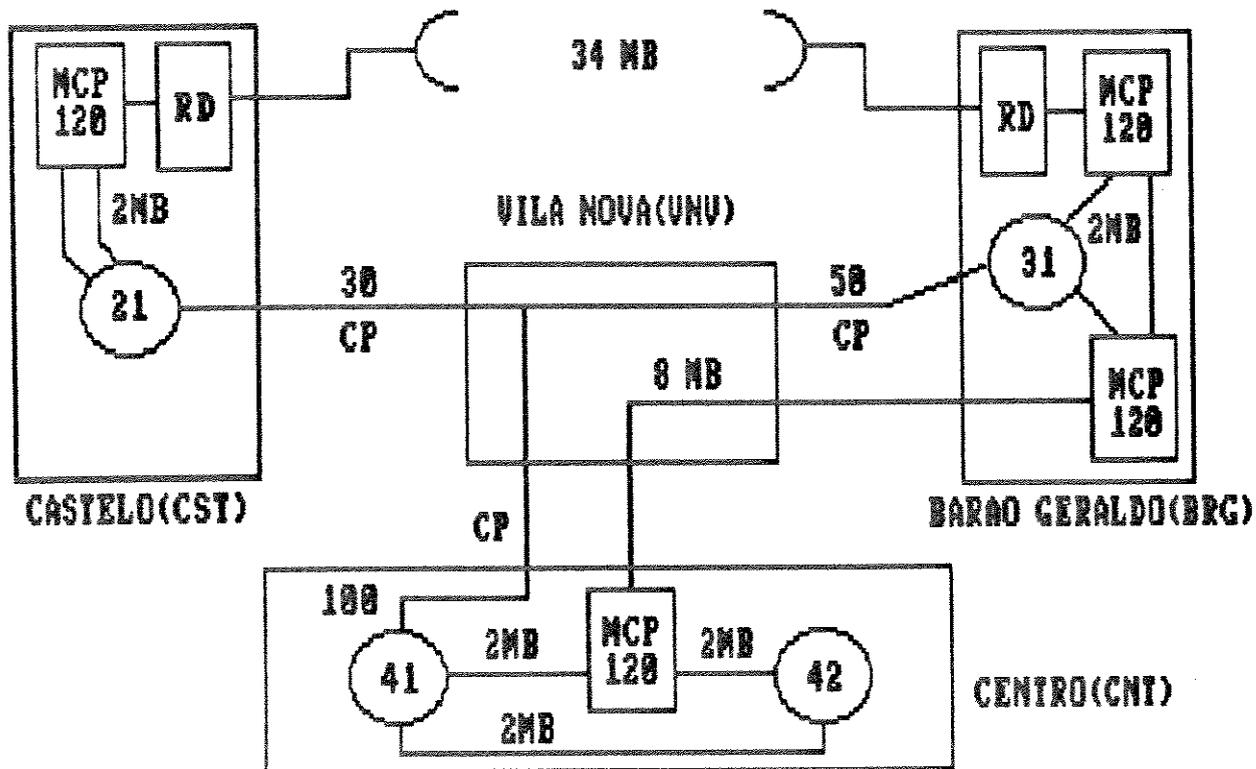


Figura 2.2.1. - Rede exemplo para formalização de elementos da rede telefônica.

O nó Vila Nova é apenas um ponto de passagem, onde se unem os cabos de pares que interligam os nós Castelo e Barão Geraldo ao Centro.

Um exemplo de arco físico é a ligação entre Centro e Vila Nova. Podemos supor que este arco seja uma galeria subterrânea por onde passam um cabo de 100 pares e um cabo coaxial PCM. O cabo de pares e o cabo PCM são os meios de transmissão.

A figura 2.2.2. apresenta um diagrama desta rede mostrando apenas

os enlaces, considerando-se apenas o ponto de vista externo aos nós físicos:

Enlace de rádio entre Castelo e Barão Geraldo.

Enlace digital a 8 Mbits entre Barão Geraldo e Centro.

Enlace analógico de 50 pares entre Barão Geraldo e Centro.

Enlace analógico de 30 pares entre Castelo e Centro.

O enlace analógico entre Castelo e Centro passa por dois arcos físicos. Em cada arco é utilizado um meio diferente que são os cabos de 30 e 100 pares. A mudança de meio ocorre em Vila Nova.

Embora um enlace permita a mudança de meio de transmissão, não é possível a mudança de tecnologia ou de hierarquia digital. Estas mudanças exigem equipamentos terminais e caracterizam um novo enlace.

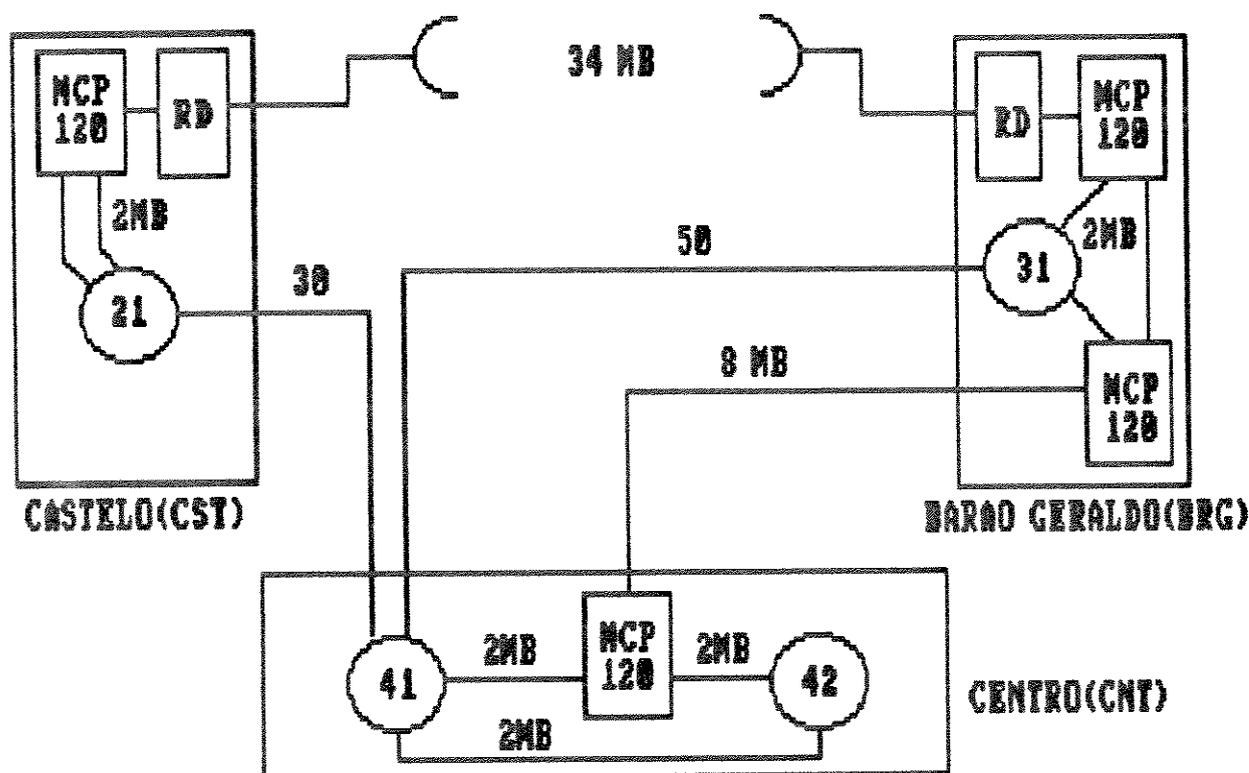


Figura 2.2.2. - Diagrama com os enlaces da rede exemplo.

A figura 2.2.3. apresenta as rotas físicas para esta rede. Os números entre parênteses indicam quais as rotas lógicas que utilizam estas rotas físicas. A figura 2.2.4. apresenta um diagrama das rotas lógicas da rede e entre parênteses o número de circuitos correspondente.

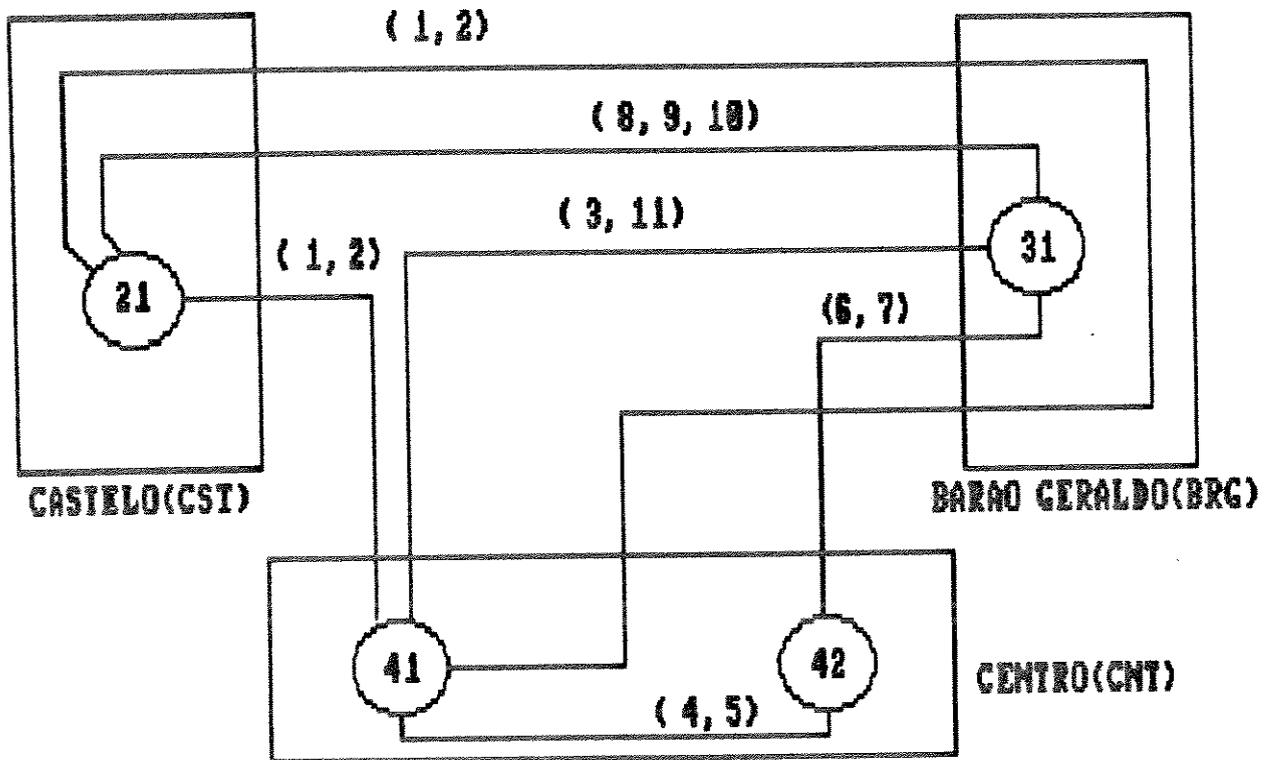


Figura 2.2.3. - Descrição das rotas físicas para a rede exemplo. Os números entre parênteses indicam as rotas lógicas que utilizam circuitos de cada rota física.

As rotas lógicas estão relacionadas ao plano de encaminhamento e mostram como as centrais estão interligadas. As rotas físicas mostram os caminhos físicos que constituem as rotas lógicas. Existe um grau elevado de liberdade entre as rotas físicas e lógicas e

conseqüentemente entre rede física e rede lógica. As rotas lógicas 1 e 2 ilustram esta relativa independência.

As rotas lógicas 1 e 2 interligam as centrais 21 e 41. Por outro lado, entre estas centrais existem dois caminhos físicos possíveis, que caracterizam duas rotas físicas distintas. A primeira rota física é constituída do enlace analógico direto entre as centrais 21 e 41. A outra rota física é composta por parte dos canais do enlace de rádio que estão ligados ao enlace digital de 8 Mbits entre Barão Geraldo e Centro. A rota lógica 1 possui parte de seus circuitos na primeira rota física e parte na segunda. O mesmo ocorre para a rota 2.

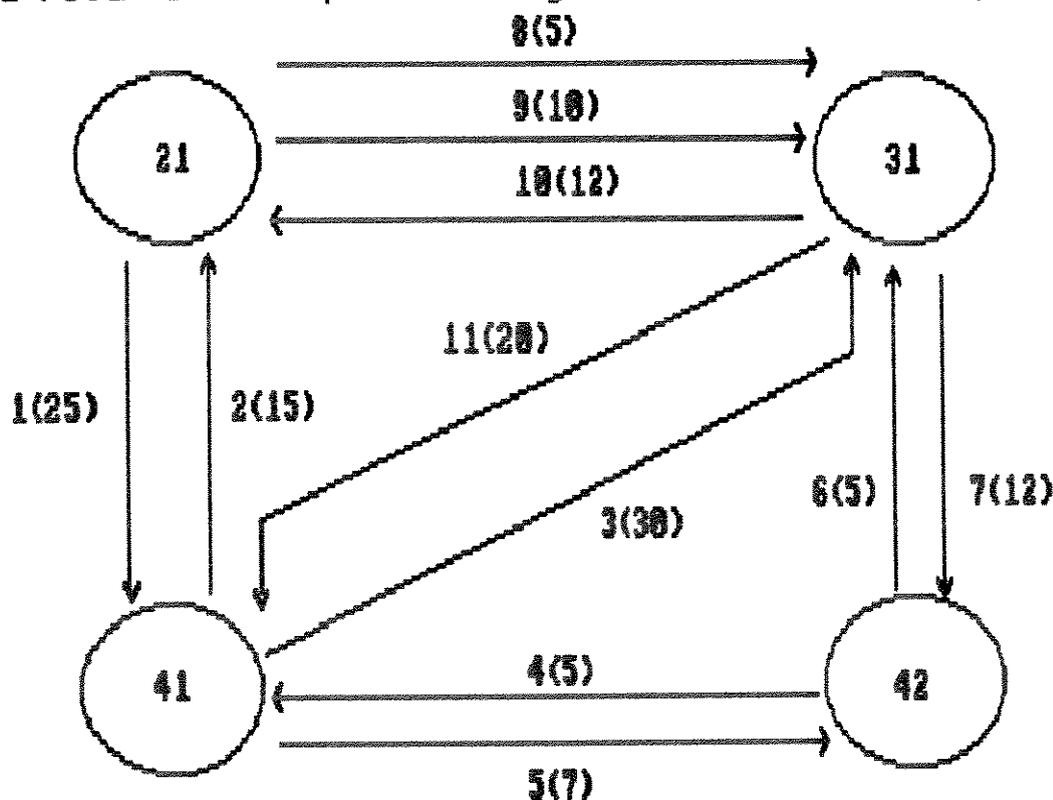


Figura 2.2.4. - Diagrama da rede lógica para a rede exemplo. Os números entre parenteses indicam o número de circuitos para cada rota lógica.

Esta distinção entre rede física e lógica se acentua em redes digitalizadas. Uma vez que uma falha de equipamento digital retira de operação um grande número de circuitos, é preciso distribuir os circuitos de uma rota lógica em vários caminhos físicos diferentes com a finalidade de assegurar um funcionamento satisfatório da rede em situações de contingência. Por outro lado o custo de transmissão e comutação no cenário digital possibilita diversas alternativas de encaminhamento e roteamento.

2.2.2. Caracterização das Redes Telefônicas.

O plano de encaminhamento é o principal elemento que define a estrutura lógica da rede funcional.

Uma rede pode ser classificada, quanto ao tipo de tráfego, como local ou interurbana. A rede local atende ao tráfego entre assinantes de uma mesma cidade ou de cidades próximas entre si. A rede interurbana atende o tráfego entre cidades diferentes. Em geral as redes locais e interurbanas apresentam estruturas diferentes devido ao volume de tráfego e à distância entre centrais.

As redes podem ser classificadas, quanto a sua estrutura lógica, como redes hierárquicas ou não hierárquicas.

As redes hierárquicas apresentam, para as centrais de trânsito ou tandem, uma estrutura em níveis. Uma central de trânsito ou tandem é aquela cuja principal função é interligar outras centrais entre si. A central tandem é uma central de trânsito utilizada no encaminhamento de chamadas locais. Nas redes hierárquicas há uma subordinação dos níveis inferiores aos níveis superiores. Esta subordinação se traduz por meio de regras que restringem o encaminhamento. Basicamente, uma central de trânsito não deve encaminhar chamadas originadas ou terminadas em centrais a ela não

subordinadas.

A rede nacional de telefonia possui quatro níveis hierárquicos. As centrais são denominadas centrais de trânsito classe I, II, III ou IV de acordo com o nível a que pertencem. As centrais de classe I são as de maior hierarquia. A área geográfica atendida por uma central de trânsito e por todas as centrais de trânsito de classe inferior a ela subordinada direta ou indiretamente é denominada área de grupamento. De acordo com a classe da central a área de grupamento é chamada de primária, secundária, terciária ou quaternária. A área atendida por uma rede local ligada a uma central de qualquer classe também pode ser chamada de área quaternária.

A estrutura não hierárquica permite a livre interligação entre centrais, sem qualquer tipo de subordinação.

2.2.3. - Técnicas de Encaminhamento.

Existem duas técnicas principais de encaminhamento: encaminhamento por rotas alternativas e encaminhamento por repartição de cargas.

No encaminhamento por rotas alternativas uma chamada, ao encontrar uma determinada rota congestionada, pode tentar obter um circuito em uma outra rota chamada rota alternativa. Este processo é chamado de transbordo.

O encaminhamento por repartição de cargas distribui o tráfego pelas diversas rotas possíveis de acordo com percentuais pré-estabelecidos. Se houver congestionamento em uma das rotas é permitido o transbordo, também distribuído, pela demais rotas.

2.2.4. - Encaminhamento para a Rede Nacional de Telefonia.

As redes telefônicas do passado e a rede brasileira atual se

caracterizam por possuir uma estrutura hierárquica e utilizar a técnica de transbordo. Este tipo de rede surgiu com a introdução do encaminhamento semi-automático e automático nas redes telefônicas. Estas características estão relacionadas ao desenvolvimento tecnológico da época.

O estudo do congestionamento deste tipo de estrutura de rede historicamente utilizou uma abordagem por rotas. Isto significa que os principais elementos de planejamento e análise da rede são voltados para as rotas. O parâmetro principal considerado é a probabilidade de bloqueio nas rotas. A partir de limites de bloqueio nas rotas e regras de encaminhamento procura-se garantir um desempenho mínimo ponto a ponto, que é o parâmetro percebido pelos usuários da rede.

Neste contexto são estabelecidas as seguintes definições [TELEBRÁS 38]:

Rota de primeira escolha: É a rota na qual um dado tráfego realiza a primeira tentativa de alocação de circuitos.

Rota alternativa: É a rota que recebe o transbordo de outras rotas que podem ser de primeira escolha ou alternativas.

Rota Direta: Rota que interliga duas centrais sem subordinação hierárquica.

Rota Final: Rota que interligue uma central a outra, de ordem hierárquica superior, à qual esteja subordinada ou que interligue duas centrais de trânsito classe I. Esta rota tem baixa probabilidade de congestionamento nominal (bloqueio $< 1\%$) e não admite rota alternativa.

Rota de Alto Uso: Rota direta com alta probabilidade de congestionamento nominal (tipicamente, $1\% \leq \text{bloqueio} \leq 10\%$) que possui uma ou mais rotas alternativas.

Rota de Proteção: Sub-grupo de circuitos de uma rota final que

são ocupados somente por chamadas para as quais esta rota constitui a primeira escolha (e portanto única). Estas chamadas tentam ocupar inicialmente a rota de proteção e posteriormente os demais circuitos da rota final. A rota de proteção é dimensionada com alta probabilidade de congestionamento.

O plano de encaminhamento para uma rede hierárquica com técnica de transbordo possui os seguintes princípios de encaminhamento:

a) As centrais de trânsito classe I devem ser interligadas duas a duas através de rotas finais. Em condições normais uma chamada não deve ser encaminhada por mais de duas centrais classe I. Em situações anormais de sobrecarga e em períodos de tempo curtos pode-se empregar uma terceira central classe I como medida de proteção de caráter temporário.

b) As centrais de trânsito classe I devem ser ligadas às centrais internacionais através de rotas finais.

c) Uma central tandem local pode exercer as funções de trânsito interurbana. As centrais locais podem ser subordinadas a centrais de trânsito de qualquer classe.

d) As rotas finais devem ter baixas perdas (< 1%).

e) Sempre que o tráfego e o custo justificarem poderão ser abertas rotas diretas entre quaisquer centrais. As chamadas encaminhadas por rotas diretas somente poderão ser comutadas por centrais pertencentes à cadeia de rotas finais que interligue origem e destino.

f) Uma chamada não deve ser encaminhada por central de classe superior se houver uma rota equivalente em número de comutações através de centrais de classe inferior.

g) Sempre que uma rota final receber transbordo considerável de

tráfego originado em rotas de alta perda, as rotas finais devem possuir rotas de proteção. Este procedimento evita que o tráfego de primeira escolha seja prejudicado pelo de transbordo.

2.3. Modelos de Redes Telefônicas.

A representação de um sistema é denominada modelo. O objetivo de um modelo é estudar o comportamento de um determinado sistema. Este modelo pode ser desde uma representação física do sistema, como um aeromodelo, até uma representação puramente matemática, como uma equação diferencial que represente o comportamento de um circuito elétrico.

Os modelos são classificados de formas diversas por diferentes autores. A classificação a seguir é a apresentada por Mihram [MIHRAM 27].

Um modelo de simulação é um modelo simbólico, que não reproduz as características físicas do sistema, e onde os símbolos não são totalmente manipulados por regras puramente matemáticas ou lógicas.

Os modelos que manipulam símbolos de forma puramente matemática ou lógica são chamados de formalizações. As formalizações podem ser diferenciadas quanto à forma de resolução, que pode ser numérica ou analítica [GORDON 16].

Para o estudo de cada sistema há um tipo de modelo mais conveniente a ser utilizado. Alguns sistemas possuem características que dificilmente podem ser consideradas em modelos de formalização. As simulações possuem maior flexibilidade neste aspecto. Nelas, características complicadas não exigem grandes esforços de implementação. De modo geral, sistemas complexos são mais facilmente representados em simulações, desde que seja conhecido o comportamento de seus componentes isoladamente e as regras de interação entre eles.

Por outro lado os modelos de formalização apresentam um tempo de processamento quase sempre menor que o utilizado pelas simulações.

Os modelos de formalização ou de simulação podem ser classificados em determinísticos ou probabilísticos.

Os probabilísticos envolvem probabilidades no modelamento de seus componentes ou nas regras de interação entre eles. Para estes modelos os parâmetros obtidos a partir da simulação também envolvem conceitos probabilísticos. Deseja-se conhecer médias, distribuições de probabilidades, variâncias, etc. Nestes casos as formalizações apresentam resultados bem definidos, dentro de uma determinada precisão. As simulações, ao contrário, apresentam como resultado um intervalo e uma probabilidade de que a solução esteja contida nele. Há sempre um grau de incerteza envolvido nos resultados.

Em telecomunicações, freqüentemente são utilizados tanto modelos de simulação quanto formalizações para representar um mesmo sistema. Devido ao grande porte das redes telefônicas, as simulações são pouco práticas, exigindo grandes recursos computacionais. Elas podem analisar redes complexas com grande riqueza de detalhes mas tem problemas em simular altos valores de intensidade de tráfego.

Por outro lado as formalizações apresentam uma grande dificuldade em representar a rede de forma precisa. São necessárias aproximações e simplificações do modelo. As formalizações podem tratar redes com valores elevados de tráfego. Se as duas abordagens forem utilizadas de maneira complementar, é possível a obtenção de resultados confiáveis, com eficiência.

O modelo de simulação é utilizado para validação do modelo analítico, permitindo uma avaliação das aproximações e simplificações envolvidas. Com seu auxílio, pode-se verificar o efeito na precisão do modelo analítico de hipóteses simplificadoras, cujo tratamento sem

estas hipóteses é facilmente introduzido na simulação com eventos discretos e inviável analiticamente.

É possível também utilizar o modelo de simulação para estudos genéricos de topologia em redes fictícias de baixo tráfego, mas com configurações complexas.

O modelo analítico é utilizado para analisar as redes com frequência economizando recursos computacionais e permitindo maior produtividade do planejamento e gerenciamento de redes.

2.4. Avaliadores de Desempenho.

O avaliador de redes telefônicas é um aplicativo computacional que permite ao planejador verificar se as diversas especificações iniciais da rede projetada foram cumpridas.

O processo de planejamento de redes procura minimizar os custos de expansão, satisfazendo os requisitos mínimos de desempenho e as normas técnicas. A atividade de planejamento é dividida em subprojetos, sujeitos a simplificações e aproximações, uma vez que a elaboração da rede é uma tarefa demasiadamente complexa para que seja possível realizá-la de forma global e exata.

Torna-se, portanto, necessária a utilização de um avaliador que permita verificar de forma precisa os resultados da síntese da rede.

Uma outra função do avaliador é permitir o estudo das redes fora das condições nominais de operação, como por exemplo nos casos de sobrecarga de tráfego ou de panes em equipamentos. Em geral, o tráfego oferecido considerado na fase de planejamento é uma estimativa, sujeito a variações e que ocorrem também durante a fase de operação.

O principal parâmetro considerado no planejamento de redes telefônicas é o custo de implantação. O processo de planejamento pode ser definido como a otimização do custo de implantação respeitando as

restrições técnicas. Uma das principais restrições é a probabilidade de bloqueio da rede telefônica. O método de planejamento clássico utiliza uma abordagem por rotas. Isto significa que são considerados os parâmetros de cada rota. Esta abordagem se contrapõe à abordagem ponto a ponto onde o principal parâmetro é o bloqueio ponto a ponto, que é percebido pelo usuário.

No planejamento clássico a principal restrição é o bloqueio das rotas. As normas nacionais de telecomunicações definem dois valores máximos para o bloqueio. Para as rotas finais admite-se um bloqueio máximo de 1% e para as demais rotas um bloqueio máximo de 10%.

O processo de otimização da rede frequentemente leva a utilização de rotas de grande porte na rede telefônica. Este tipo de rota possui uma economia de escala. É sempre mais econômico, em número de circuitos, concentrar vários tráfegos em uma rota do que utilizar rotas menores para cada tráfego, considerando-se a mesma restrição de bloqueio nos dois casos. A solução de rotas pequenas somente é considerada se o seu custo contrabalançar este ganho de escala.

Embora a utilização de rotas de grande porte traga uma diminuição de custos, há uma diminuição da robustez da rede [SALLAY 34]. No caso de sobrecarga de tráfego, falha em equipamentos ou outros casos de contingência, o efeito na probabilidade de bloqueio nas rotas aumenta com o número de circuitos. A tabela 2.4.1. apresenta a probabilidade de bloqueio para uma sobrecarga de tráfego de 10%. São analisados os casos para bloqueios nominais de 1% e 10%.

A figura 2.4.1. apresenta um gráfico do fator de ocupação para rotas com probabilidade de bloqueio nominal de 1%, 5% e 10%. A figura 2.4.2. apresenta uma curva da probabilidade de bloqueio para uma rota com 10% de sobrecarga de tráfego em relação às condições nominais de bloqueio de 1% e 10%.

CIRC.	BLOQUEIO NOMINAL = 1%			BLOQUEIO NOMINAL = 10%		
	TRÁFEGO NOMINAL	TRÁFEGO SOBREC.	BLOQUEIO SOBREC.	TRÁFEGO NOMINAL	TRÁFEGO SOBREC.	BLOQUEIO SOBREC.
1	0.010	0.011	0.011	0.111	0.122	0.109
5	1.361	1.497	0.014	2.881	3.169	0.125
10	4.461	4.907	0.017	7.511	8.262	0.134
15	8.108	8.919	0.019	12.484	13.732	0.139
20	12.031	13.234	0.021	17.613	19.374	0.143
25	16.125	17.737	0.022	22.833	25.116	0.146
30	20.337	22.371	0.024	28.113	30.924	0.149
35	24.638	27.102	0.025	33.434	36.778	0.151
40	29.007	31.908	0.026	38.787	42.666	0.153
45	33.432	36.775	0.027	44.165	48.582	0.154
50	37.901	41.692	0.028	49.562	54.518	0.156
55	42.409	46.650	0.029	54.975	60.473	0.157
60	46.950	51.645	0.030	60.401	66.441	0.158
65	51.519	56.670	0.031	65.839	72.423	0.159
70	56.112	61.723	0.032	71.286	78.414	0.160
75	60.728	66.801	0.033	76.741	84.415	0.161
80	65.363	71.899	0.034	82.203	90.424	0.161
85	70.015	77.017	0.035	87.672	96.439	0.162
90	74.684	82.153	0.036	93.146	102.461	0.163
95	79.368	87.305	0.036	98.626	108.488	0.163
100	84.064	92.470	0.037	104.110	114.521	0.164
150	131.575	144.733	0.043	159.123	175.035	0.168
200	179.738	197.712	0.048	214.323	235.755	0.170
250	228.297	251.127	0.052	269.622	296.585	0.172
300	277.126	304.838	0.055	324.983	357.481	0.173
350	326.153	358.768	0.057	380.384	418.422	0.174
400	375.333	412.866	0.060	435.813	479.395	0.175
450	424.635	467.099	0.062	491.264	540.390	0.176
500	474.036	521.440	0.063	546.730	601.403	0.176
550	523.521	575.873	0.065	602.208	662.429	0.176
600	573.077	630.385	0.066	657.697	723.466	0.177
650	622.694	684.963	0.068	713.194	784.514	0.177
700	672.364	739.600	0.069	768.698	845.567	0.177
750	722.078	794.286	0.070	824.205	906.626	0.178
800	771.835	849.019	0.071	879.720	967.692	0.178
850	821.630	903.794	0.072	935.238	1028.761	0.178
900	871.457	958.603	0.073	990.758	1089.834	0.178
950	921.317	1013.449	0.074	1046.281	1150.909	0.178
1000	971.206	1068.327	0.074	1101.807	1211.988	0.179

TABELA 2.4.1. - A tabela mostra para um dado número de circuitos o tráfego oferecido para obter uma probabilidade de bloqueio nominal (1% e 10%), o tráfego oferecido com uma sobrecarga de 10% e a probabilidade de bloqueio no caso de sobrecarga.

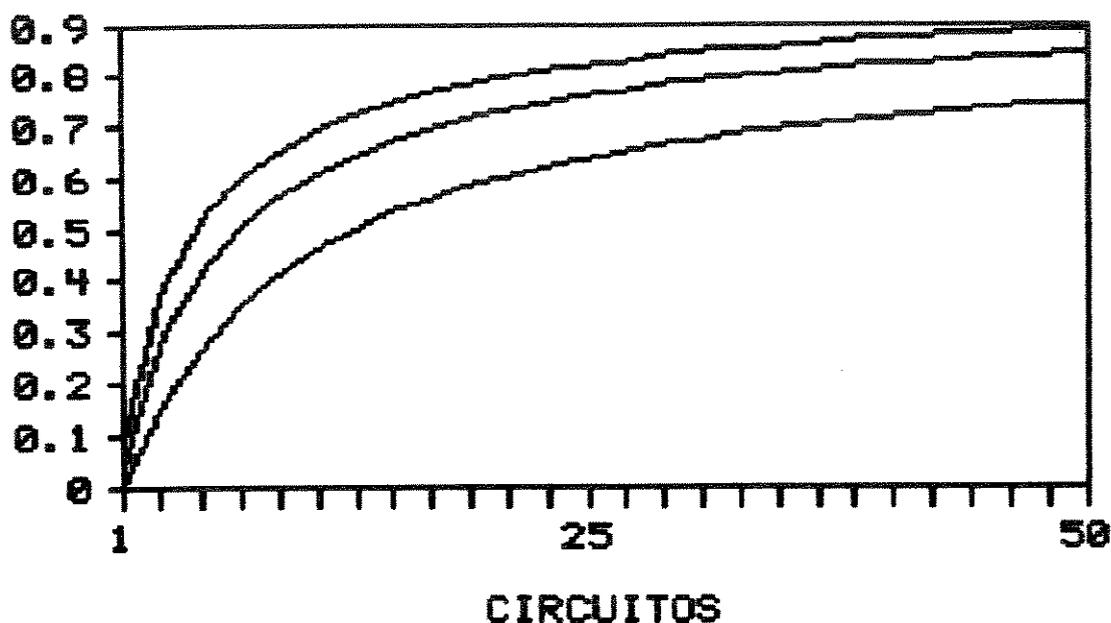
**FATOR DE OCUPAÇÃO
BLOQUEIOS DE 1%, 5% E 10%**

Figura 2.4.1. - Fator de ocupação para rotas com probabilidade de bloqueio nominal de 1%, 5% e 10%.

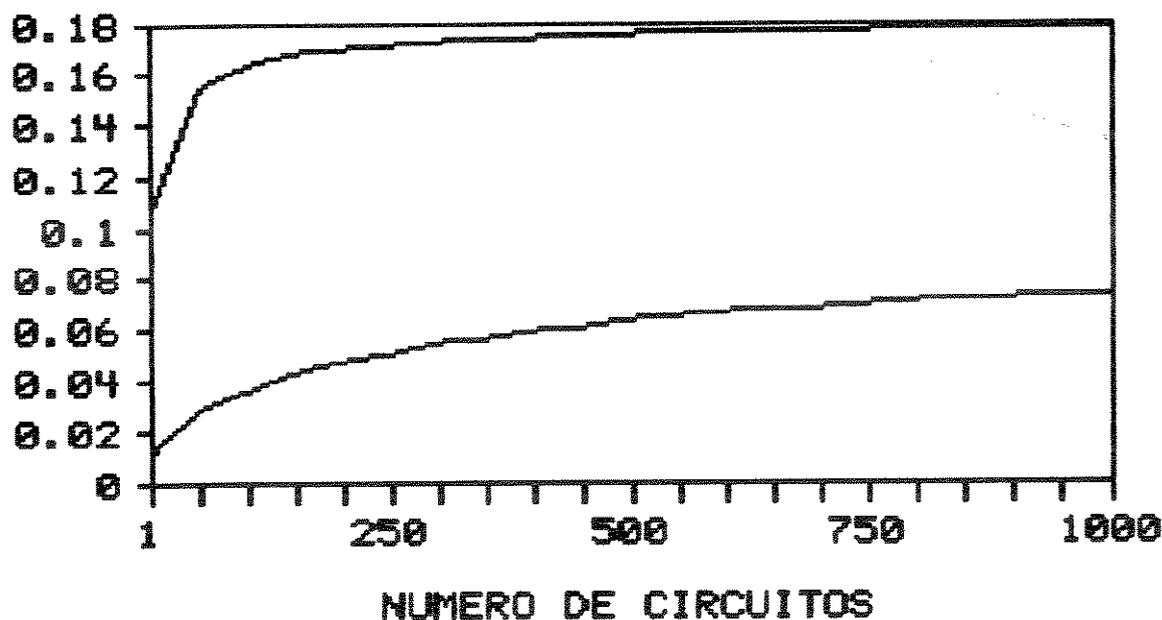
**BLOQUEIO PARA SOBRECARGA DE 10%
BLOQUEIO NOMINAL DE 1% E 10%**

Figura 2.4.2. - Probabilidade de bloqueio em sobrecarga de 10%.

Um avaliador permite verificar para uma dada rede sua sensibilidade quanto a perturbações das condições nominais e a relação custo/benefício do aumento de robustez da rede.

A seguir são analisadas algumas ferramentas computacionais para avaliação de redes telefônicas. São apresentados os modelos MALEPESTE, ENSEMBLE, MNM e LCM. A nível nacional não se tem conhecimento de ferramentas exclusivamente de análise de redes telefônicas.

2.4.1. MALEPESTE.

O CNET (Centre National d'Etudes de Télécommunication) da França desenvolveu em 1978 um avaliador de topologia denominado MALEPESTE (Modelo para análise de perturbações em redes de telecomunicações). Sua principal aplicação é no estudo da robustez das estruturas das redes [CAMOIN 08].

Os aplicativos de planejamento, tais como o OTELO da TELESP, o SATIN e o SPARTACUS do CNET, permitem dimensionar, com custo mínimo, uma rede telefônica para escoar um certo tráfego oferecido, com uma dada qualidade de serviço. Por exemplo, a perda de chamadas telefônicas devido ao bloqueio nos circuitos de entroncamento deve ser inferior a 6% para cada par origem-destino da matriz de tráfego. De fato, os algoritmos de dimensionamento utilizam uma restrição de no máximo 1% de perdas nas rotas de última escolha.

Em um estudo realizado pelo CNET chegou-se a conclusão que uma mesma rede projetada com topologias distintas, apresentou custos relativamente próximos, ou seja, a função custo é plana nas proximidades do ponto de custo ótimo. Verificou-se também que a matriz de tráfego oferecido, um dos parâmetros de entrada para o dimensionamento obtida a partir de uma estimativa, freqüentemente se afasta dos valores reais. Assim a escolha de redes com custos próximos

deve ser feita tendo em vista a robustez da solução em relação à imprecisão da matriz de tráfego, à sobrecarga de tráfego e à pane nos equipamentos. É com este objetivo que são desenvolvidos os avaliadores de topologia e em particular o MALEPESTE.

O modelo probabilístico utilizado pelo MALEPESTE é o mesmo que o utilizado pelo SATIN. Os tráfegos não transbordados utilizam o modelo de Erlang e os transbordados utilizam o modelo equivalente de Wilkinson. Para o cálculo do bloqueio em uma dada rota é suposto que o tráfego escoado nesta rota não será bloqueado à frente. No cálculo das rotas à frente o tráfego das rotas anteriores é somado aos tráfegos novos e aos transbordados, compondo o tráfego oferecido à nova rota. Este processo fica prejudicado nos casos de rotas bidirecionais. Este método de cálculo é apresentado detalhadamente no capítulo 4, onde é chamado de encadeamento por tráfego oferecido.

Este modelo é bastante simplificado e compatível com as necessidades de um dimensionador. Um analisador de redes pode e deve possuir um modelo mais acurado, que estime melhor os bloqueios da rede. Em particular os bloqueios em rotas anteriores e posteriores devem ser considerados na determinação do bloqueio de uma dada rota.

Os principais parâmetros de avaliação de desempenho de redes utilizados pelo MALEPESTE são:

- Percentagem de tráfego perdido (p).
- A média (π) da percentagem de tráfego perdido por fluxo (origem-destino). A comparação entre os parâmetros p e π permite avaliar a dispersão das perdas em relação aos fluxos.
- A percentagem de tráfego que tem perda superior a 6%.
- A percentagem das rotas finais com perda superior a 1%.

Estes parâmetros são obtidos em três casos distintos:

- Perturbações na matriz de tráfego.
- Sobrecarga.
- Panes.

As perturbações da matriz de tráfego são modeladas por uma função de distribuição de probabilidade log-normal.

Outro parâmetro obtido é a taxa de perda de tráfego de um enlace físico, que é definido como sendo a relação entre o tráfego perdido, supondo o enlace rompido, menos o tráfego perdido em condições nominais e o tráfego escoado pelo enlace em condições nominais.

Um enlace físico suporta total ou parcialmente várias rotas e sua ruptura reduz a capacidade de cada uma destas rotas, provocando um aumento do tráfego perdido.

2.4.2. ENSEMBLE.

O avaliador ENSEMBLE, de autoria de Eugene Pinsky e outros [BINNEY 06], é um aplicativo computacional para análise probabilística de redes de telecomunicações.

A rede, o encaminhamento e o tráfego são definidos por uma linguagem de descrição que é interpretada pelo pacote. Como saída o ENSEMBLE apresenta a probabilidade de bloqueio de cada rota, as probabilidades de bloqueio ponto-a-ponto e a receita gerada pelo tráfego escoado. A análise de contingências (panes e sobrecargas) pode ser feita através da modificação da rede via linguagem de descrição.

A principal deficiência do ENSEMBLE se encontra no método de resolução das equações probabilísticas, que é do tipo de relaxação com erros significativos para probabilidades de bloqueio menores que 10%.

2.4.3. MNM e LCM da British Telecom.

A divisão de engenharia de desempenho da British Telecom desenvolveu dois modelos para estudos de sua rede telefônica [ACKERLEY 11]. O objetivo dos modelos é permitir a tomada de decisões sobre procedimentos operacionais da rede.

O modelo MNM (Main Network Model) tem capacidade para analisar redes nacionais de grande porte. Pode ser aplicado à redes planejadas considerando como grau de serviço o parâmetro bloqueio nas rotas. O modelo se baseia no método de Erlang invertido desenvolvido por [LE GALL 24] a partir dos trabalhos de [BONATTI 07].

O modelo LCM (Local Cell Model) é voltado para pequenas redes locais e cujo planejamento utiliza como grau de serviço o bloqueio ponto-a-ponto. O modelo é do tipo analítico de um momento, semelhante ao apresentado por [LIN 26].

Os dois modelos avaliam o congestionamento da rede em termos da distribuição do grau de serviço total, que é definido como a frequência com que um usuário ou uma parcela do tráfego, escolhidos arbitrariamente, percebem o bloqueio ponto-a-ponto. Esta distribuição é obtida em relação a variações do tráfego oferecido.

Esta abordagem permite não apenas determinar o valor médio de bloqueio, mas também avaliar seu comportamento em relação às variações de carga que ocorrem durante a operação da rede tanto a curto como a longo prazo. Os modelos permitem a utilização de qualquer distribuição destas variações.

Esta nova abordagem para análise de desempenho tem sido desenvolvida em função da competição entre empresas telefônicas nos EUA, Japão e Reino Unido. Nestes casos torna-se necessário avaliar a rede do ponto de vista do usuário. Pesquisas de mercado sugerem que a opinião do usuário com relação ao desempenho do serviço telefônico é

mais fortemente influenciada por dias isolados em que há um maior congestionamento do que pelo desempenho médio global. É interessante, portanto, que a avaliação da rede utilize como grau de serviço o bloqueio ponto-a-ponto ao invés do bloqueio nas rotas, como é usual na abordagem clássica. É preciso não apenas avaliar o grau de serviço nas condições nominais, mas também em presença de perturbações de carga.

2.5. Conclusões.

Apresentou-se neste capítulo a necessidade do uso de ferramentas de síntese e análise para o planejamento de redes telefônicas. Em geral as ferramentas de síntese são menos precisas e mais eficientes em termos de tempo de execução. As ferramentas de análise são mais precisas e podem ser menos eficientes computacionalmente.

A rede telefônica é complexa e exige uma estruturação para permitir seu planejamento, operação e manutenção. Existe uma rede física e uma rede lógica. A rede física é constituída pela rede de assinantes, pela comutação e pela transmissão. A rede lógica descreve como os equipamentos de comutação são interligados e como as chamadas telefônicas percorrem a rede.

Este contexto exige ferramentas de análise que possibilitem:

- A validação do processo de planejamento, na avaliação dos resultados da fase de síntese em condições nominais ou em condições de contingência.

- O estudo de novas técnicas de encaminhamento.

- O estudo de redes telefônicas já implantadas com o objetivo de otimizar seu desempenho ao longo do tempo, de acordo com as variações de tráfego e disponibilidade de recursos.

Os avaliadores de redes telefônicas podem utilizar dois tipos básicos de modelos: O modelo analítico ou o modelo de simulação a

eventos discretos.

O modelo analítico é mais eficiente em termos de tempo de execução. Em contrapartida envolve simplificações e aproximações que levam a uma imprecisão nos resultados.

O modelo de simulação por sua vez apresenta como resultado um intervalo de confiança e um nível de confiança do resultado. Este intervalo tende a diminuir com o aumento do tempo de simulação. O modelo de simulação, devido à sua estrutura, possui uma grande capacidade de incorporação de novas características sem grandes dificuldades, enquanto que o modelo analítico pode exigir grandes alterações.

Do ponto de vista prático o modelo de simulação é mais adequado aos estudos de novas técnicas de encaminhamento e validação de outros modelos, onde o tempo de execução seja um fator não limitante, de forma a permitir a obtenção de resultados precisos. O modelo analítico é mais adequado ao planejamento ou gerenciamento de redes telefônicas.

Resumindo, neste capítulo, conclui-se pela necessidade de desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada num modelo de simulação (SIMTRAF) e de uma ferramenta baseada num modelo analítico (ANATRAF).

CAPÍTULO 3. - SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS.

Neste capítulo é apresentado o modelo de simulação a eventos discretos de redes telefônicas SIMTRAF e são discutidos alguns dos aspectos introdutórios à teoria de simulação a eventos discretos e os princípios básicos da teoria das probabilidades envolvidos no processo de simulação e de análise dos resultados.

Para efeito de comparação é apresentado um simulador de redes desenvolvido a partir de um pacote comercial para simulação de sistemas.

3.1.- Introdução à Teoria de Simulação a Eventos Discretos.

3.1.1. Introdução.

A simulação a eventos discretos em computadores digitais pode ser definida como a representação do comportamento dinâmico de um sistema por meio de suas transições de estado, de acordo com regras operacionais bem definidas [PRITSKER 31]).

Um estado é determinado por uma combinação de valores assumidos por determinadas variáveis do sistema, chamadas variáveis de estado. Cada combinação deve caracterizar um único estado ou condição do sistema. As transições de estado são chamadas de eventos. Se as transições ocorrem de forma discreta no tempo o modelo é chamado simulação a eventos discretos.

A simulação de uma rede telefônica é uma simulação a eventos discretos onde, por exemplo, são eventos o início e o término das chamadas telefônicas e os estados são caracterizados pelo número de circuitos ocupados em cada rota.

Pode-se definir funcionalmente uma simulação a eventos discretos

em computadores digitais segundo o algoritmo apresentado na figura 3.1.1. [MIHRAM 27].

O bloco de inicialização tem como função organizar a fila de eventos e inicializar as variáveis do programa, de acordo com o estado inicial do sistema simulado. Esta fila, também chamada de calendário, determina o instante de ocorrência de cada evento.

O bloco de controle gerencia o calendário, retirando dele seqüencialmente os eventos e encaminhando-os para o bloco de seleção de eventos. Cada tipo de evento é tratado por uma rotina específica que ao final retorna ao bloco de controle.

Durante a execução, novos eventos podem ser adicionados ao calendário, de acordo com o progresso da simulação.

Esta estrutura tem como objetivo facilitar o desenvolvimento do modelo, dando ao projetista uma boa flexibilidade para modificações ou novas implementações.

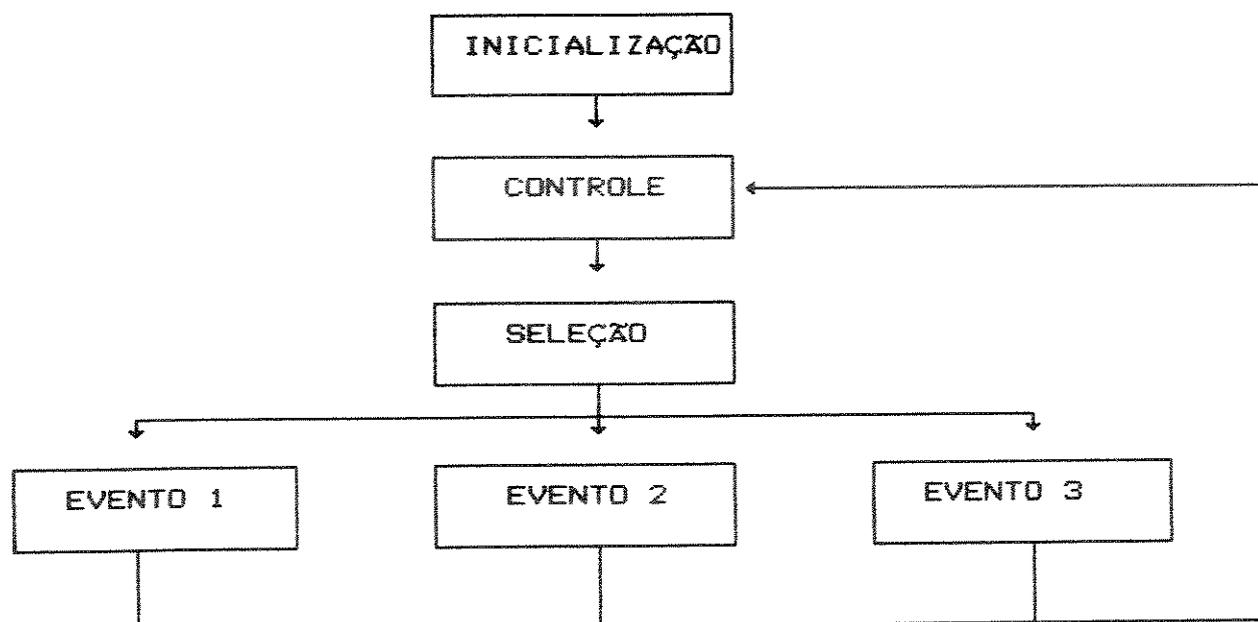


Figura 3.1.1 - Algoritmo de simulação a eventos discretos.

Os modelos de simulação são utilizados freqüentemente para o

estudo de processos probabilísticos. Estes modelos envolvem vários aspectos estatísticos, tais como: geração de variáveis aleatórias e análise de resultados.

3.1.2. Geração de Variáveis Aleatórias.

Um sistema que tenha um comportamento aleatório exigirá um processo de geração de variáveis aleatórias para sua simulação. A literatura apresenta como método mais conveniente a geração de uma variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo $[0,1]$ e sua transformação na variável desejada [PRITSKER 31]. As amostras geradas com distribuição uniforme são chamadas de números aleatórios.

No ambiente dos computadores digitais existem ao menos 3 formas de geração de números aleatórios.

A primeira delas é utilizar tabelas de números aleatórios, obtidas através de algum processo externo ao computador.

A segunda consiste em instalar no computador uma fonte de ruído aleatório.

A terceira e mais prática solução é utilizar algoritmos de geração de números pseudo-aleatórios. Estes algoritmos geram seqüências cujo enésimo número é obtido a partir dos números gerados anteriormente. Isto significa que a seqüência de números depende apenas da condição inicial das variáveis do algoritmo, que é chamada de semente. A seqüência não é verdadeiramente aleatória uma vez que é deterministicamente definida pelo algoritmo. Estes algoritmos devem possuir as seguintes propriedades [PRITSKER 31]:

- Os números gerados devem ser uniformemente distribuídos no intervalo $[0,1]$.
- Não deve haver correlação na seqüência gerada.
- Muitos números devem ser gerados antes que a seqüência se

repita, ou seja, deve possuir grande comprimento de ciclo.

- A seqüência deve ser reprodutível. Isto garante que a utilização de diferentes sementes implica em diferentes seqüências.

- A geração deve ser rápida, uma vez que muitos números são necessários em uma simulação.

- Deve requerer pouca capacidade de memória.

A técnica mais empregada atualmente para geração de números aleatórios é conhecida como método congruente misto. O nome do método deriva do fato de possuir uma adição e uma multiplicação. Existem os métodos congruentes aditivos e multiplicativos que utilizam apenas uma ou outra operação. O nome congruente é devido à relação de congruência entre inteiros " $y \equiv x \pmod{m}$ ". Esta relação é a base deste gerador de números pseudo-aleatório.

No método congruente misto a seqüência é gerada a partir da equação recursiva 3.1.1. [FISHMAN 11-12]:

$$U_k = (a \cdot U_{k-1} + c) \pmod{m} \quad (3.1.1.)$$

$$R_k = U_k / (m-1)$$

Onde:

$$k = 1, 2, \dots$$

$$U_i, a, c, m \in \mathbb{N}^+.$$

c e m devem ser primos entre si.

$$a - q \cdot j = 1 \text{ para todo } q \text{ fator primo de } m. \quad (3.1.2.)$$

$$a - 4 \cdot j = 1 \text{ se } 4 \text{ é divisor de } m. \quad (3.1.3.)$$

para algum $j, j = 1, 2, \dots$

A seqüência gerada por este método possui um comprimento de ciclo m . U_0 é chamada de semente. A seqüência U produz números no intervalo

$[0, m-1]$. Para se obter uma seqüência no intervalo $[0,1]$ (seqüência R) basta dividir U por $m - 1$.

Fishman [FISHMAN 11-12] sugere, em computadores digitais, a utilização de $m = 2^B$, onde B é o número de bits de uma palavra de memória. Esta escolha torna a operação de congruência uma decorrência natural do próprio funcionamento do computador.

O maior número inteiro representável por uma palavra de memória é $2^B - 1$. Se por exemplo for somado a $2^B - 1$ o número 1, o resultado obtido será 0 e não 2^B .

Como exemplo de escolha de parâmetros de um gerador pseudo-aleatório para um computador de 16 bits tem-se $m = 2^{16}$. Os parâmetros c e m devem ser primos entre si. Neste caso específico, pode-se escolher para c qualquer número ímpar, por exemplo 27.

O valor do parâmetro a deve obedecer a equação:

$$a = 1 + 4.j \quad (3.1.4)$$

Onde j deve ser um número inteiro escolhido arbitrariamente. Neste caso específico, onde m é uma potência de 2, o único fator primo de m é 2. As equações (3.1.2.) e (3.1.3.) tornam-se redundantes. No caso $m = 2^B$ a literatura sugere $j = 2^{B/2-2}$. Este valor tem como objetivo minimizar a correlação entre dois números consecutivos e otimizar o processamento, uma vez que para j múltiplo de 2 basta realizar $B/2$ deslocamentos à esquerda de U_{k-1} e somá-lo a U_{k-1} para realizar a operação $a.U_{k-1}$ da equação (3.1.1.). Adotando este critério para a escolha do parâmetro a tem-se:

$$a = 1 + 4.2^{16/2-2} = 1 + 256 = 257$$

Obtem-se então a seguinte equação recursiva:

$$U_k = (257 \cdot U_{k-1} + 27) \text{ Mod } 2^{16} \quad (3.1.5.)$$

Na tabela 3.1.1. é apresentada uma sequência de números aleatórios gerados a partir da equação recursiva (3.1.5) e na tabela 3.1.2. a frequência de ocorrência após 2048 amostras. O intervalo que vai de 0 a 65536 (2^{16}) foi dividido em 32 subintervalos e foi contabilizado o número de amostras contido em cada um deles.

27	6966	20817	41580	3719	38306	14269	62680	52467
49166	52777	63300	15199	39546	5269	43440	22987	9446
2817	3100	10295	24402	45421	7816	42659	18878	2009
57588	54543	58410	3653	21344	45947	11926	50353	30156
16871	10498	11037	18488	32851	54126	16777	51876	28351
11738	2037	64784	3371	14406	32353	57212	23447	62130
42189	29160	23043	23838	31545	46164	2159	30602	421
42688	26331	16886	14353	18732	30023	48226	7805	39832
13235	59086	46313	40452	41503	49466	64341	20592	49291
19366	61889	45788	36599	34322	38957	50504	3427	28798
61081	34740	15311	2794	62725	64032	6715	21846	43889
7308	43175	20418	4573	61176	59155	64046	10313	29028
54655	21658	61109	41936	29675	24326	25889	34364	49751
6514	35725	6312	49347	33758	25081	23316	28463	40522
59493	19840	52635	26806	7889	61420	56327	58146	1341
16984	39539	3470	39849	17604	2271	59386	57877	63280
10059	29286	55425	22940	62903	44242	32493	27656	29731
38718	54617	11892	41615	12714	56261	41184	33019	31766
37425	49996	3943	30338	63645	38328	19923	8430	3849
6180	15423	31578	54645	19088	55979	34246	19425	11516
10519	16434	29261	49000	10115	43678	18617	468	54767
50442	53029	62528	13403	36726	1425	38572	17095	2530
60413	59672	307	13390	33385	60292	28575	3770	51413
40432	36363	39206	48961	92	23671	54162	26029	4808
56035	48638	48153	54580	2383	22634	49797	18336	59323
41686	30961	27148	30247	40258	57181	15480	46227	18350
62921	48868	41727	41498	48181	61776	16747	44166	12961
54204	36823	26354	22797	26152	36419	53598	12153	43156
15535	60362	46565	39680					

Tabela 3.1.1. Sequência de amostras do gerador pseudo-aleatório da equação 3.1.4.

57	75	72	58	51	67	65	66	80	66	54	57	65	57	78	68
59	54	68	56	73	76	58	56	62	58	63	86	59	62	56	66

Tabela 3.1.2. Número de ocorrências em cada um dos 32 subintervalos em que foi dividido o intervalo de 0 a 65536 das 2048 amostras do gerador pseudo-aleatório da equação 3.1.5.

Uma vez obtidas amostras de uma distribuição uniforme, pode-se obter amostras de outros tipos de distribuição com a utilização do método da transformada inversa [PRITSKER 31], [FISHMAN 11-12]). Este método relaciona uma variável aleatória uniformemente distribuída e uma variável com a distribuição desejada pelo seguinte processo:

Seja R uma variável aleatória uniformemente distribuída com distribuição $G_R(r)$ e seja X uma variável aleatória com função de distribuição $F_X(x)$ qualquer. Deseja-se obter amostras de X a partir de amostras de R .

Seja uma função $f(X)$ tal que $R = f(X)$. As amostras da variável X são obtidas a partir da relação $x = f^{-1}(r)$, onde r é uma amostra da variável uniforme.

Assim $F_X(x) = f(x)$, pois

$$G_R(r) = \text{Prob} \{ R \leq r \} = r \quad 0 \leq r \leq 1$$

$$R = f(X) \Rightarrow X = f^{-1}(R)$$

$$\begin{aligned} G_R(r) &= \text{Prob} \{ f(X) \leq r \} = r \\ &= \text{Prob} \{ X \leq f^{-1}(r) \} = r \\ &= F_X (f^{-1}(r)) = r \end{aligned}$$

$$\text{Portanto } F_X(x) = f(x)$$

O método pode ser aplicado tanto a distribuições discretas como para contínuas.

Seja por exemplo:

$$F_X(x) = 1 - \exp(-\mu \cdot x)$$

Neste caso as amostras x são obtidas a partir de r por meio da seguinte relação:

$$x = (1/\mu) \cdot \ln(1/r)$$

3.1.3. Análise de Resultados.

No decorrer da simulação de modelos probabilísticos, as variáveis de estado, que descrevem o sistema, assumem valores aleatórios de forma semelhante ao que ocorre na rede telefônica real. Para poder estudar o sistema, deve-se lançar mão de parâmetros tais como média, variância e função distribuição de probabilidade destas variáveis. Neste ponto a simulação de modelos probabilísticos torna-se um problema complexo de análise dos resultados.

O procedimento para calcular o valor médio de uma variável aleatória (V), a partir da observação do próprio sistema ou de um modelo de simulação, consiste em realizar um certo número de amostras da variável ao longo do tempo.

O valor médio (\bar{v}) é dado pela expressão:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (3.1.6.)$$

Onde:

N = número de amostras.

v_i = Valor obtido na i -ésima amostra.

Devido à natureza aleatória da variável V , o parâmetro \bar{v} também é uma variável aleatória. É possível estabelecer uma relação entre as variáveis V e \bar{v} , por meio de suas médias e variâncias.

A esperança matemática ou média da variável aleatória V com distribuição invariável no tempo é definida como:

$$E\{V\} = \mu = \int v \cdot P(v) \cdot dv \quad , \text{ para } V \text{ contínuo} \quad (3.1.7.a.)$$

$$\mu = \sum v \cdot P(v) \quad , \text{ para } V \text{ discreto} \quad (3.1.7.b.)$$

Onde:

$P(v)$ = função densidade de probabilidade de v no caso contínuo ou a probabilidade de ocorrência do valor v no caso discreto.

A variância é definida como:

$$\sigma^2 = E\{(V - \mu)^2\} \quad (3.1.8.)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} \int (v - \mu)^2 \cdot P(v) \cdot dv \quad , \text{ para } V \text{ contínuo} \\ \sum (v - \mu)^2 \cdot P(v) \quad , \text{ para } V \text{ discreto} \end{cases} \quad (3.1.9.)$$

O comportamento do valor médio \bar{v} em relação ao número de amostras pode ser caracterizado pelos seguintes teoremas [PRITSKER 31]). O primeiro é chamado de lei forte dos grandes números e estabelece que quanto maior o número de amostras N , a probabilidade do valor médio se igualar à esperança se aproxima de 1.

A partir deste teorema deriva-se a lei fraca dos grandes números expressa por:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Prob} \{ |\bar{v} - \mu| > \varepsilon \} = 0 \quad (3.1.10.)$$

para qualquer ε positivo.

O segundo teorema é conhecido como teorema do limite central e estabelece que a soma de M amostras independentes de uma variável aleatória contínua, com distribuição invariável no tempo, com média μ , variância σ^2 e sem pontos de acumulação é uma variável aleatória com função densidade de probabilidade aproximadamente normal de média $M\mu$ e variância $M\sigma^2$, para $M \rightarrow \infty$.

A partir do teorema do limite central pode-se estabelecer um intervalo de confiança para a variável \bar{v} .

A partir de μ e de σ^2 é possível estabelecer que:

$$\text{Prob} \{ |\bar{v} - \mu| \leq d/2 \} \cong 1 - \alpha \quad (3.1.11.)$$

Onde:

$1 - \alpha$ = probabilidade de \bar{v} pertencer ao intervalo de confiança (nível de confiança).

d = intervalo de confiança.

Seja a variável z definida por:

$$z = \frac{(\bar{v} - \mu) \cdot \sqrt{N}}{\sigma} \quad (3.1.12.)$$

A variável z possui uma distribuição normal de média 0 e variância 1. A partir desta distribuição pode-se calcular um intervalo de confiança para z , com o auxílio de tabelas ou processos numéricos:

$$\text{Prob} \{ -dn/2 \leq z \leq dn/2 \} = 1 - \alpha \quad (3.1.13.)$$

onde dn e α estão relacionados pela curva normal ou curva de Gauss. Alguns valores estão mostrados na tabela 3.1.3.

Aplicando a relação inversa de (3.1.12.) obtem-se a relação:

$$d = dn \cdot \sigma / \sqrt{N} \quad (3.1.14.)$$

Este procedimento exige o conhecimento do parâmetro σ^2 , o que normalmente não é possível. Pode-se obter uma estimativa de seu valor a partir de amostras da simulação através da equação 3.1.15.

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \quad (3.1.15.)$$

Utilizando esta estimativa pode-se obter uma nova variável normalizada, a exemplo da expressão (3.1.12), tal que:

$$w = \frac{(\bar{v} - \mu) \cdot \sqrt{N}}{S} \quad (3.1.16.)$$

Esta variável normalizada (w) possui uma distribuição t de Student, com $N - 1$ graus de liberdade. A partir desta distribuição pode-se obter um intervalo de confiança definido por:

$$dn/2 = t_{N-1, \alpha/2} \quad (3.1.17.)$$

Onde $t_{N-1, \alpha/2}$ é tal que $\text{Prob}\{w \in [-dn/2, dn/2]\} = 1 - \alpha$.

Utilizando a relação inversa de (3.1.16.) obtem-se a expressão (3.1.11.) onde:

$$d = S \cdot dn / \sqrt{N} \quad (3.1.18.)$$

Estas relações são válidas apenas quando as amostras são independentes e igualmente distribuídas. Nos processos estocásticos as

amostragens em geral são dependentes. Por exemplo numa fila markoviana M/M/1 (chegada poissoniana e serviço exponencial) a variável tempo de espera no sistema é uma variável aleatória. Neste caso o tempo de espera de dois usuários sucessivos é dependente e esta dependência aumenta quando aumenta o tamanho médio da fila e diminui a medida que os eventos se distanciam no tempo.

O problema de simular tais processos tem sido largamente estudado. Foram desenvolvidas várias abordagens, dentre as quais está o processamento em subintervalos. Esta técnica consiste em dividir a simulação em subintervalos. O subintervalo inicial é desprezado, com a finalidade de tornar a simulação independente das condições iniciais do sistema. Nos demais subintervalos é calculado o valor médio da variável estudada:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N v_b \quad (3.1.19.)$$

Onde v_b é a amostra do subintervalo b .

As amostras v_b possuem distribuição de média μ e variância σ^2 . Portanto a variável aleatória \bar{v} possui distribuição normal de média μ e variância σ^2/N .

Por exemplo, seja um processo onde periodicamente mede-se o seu valor de forma que as medidas sejam independentes. Estas medidas apresentam valor médio $\bar{v} = 10$ e variância $\sigma^2 = 10$. As tabelas 3.1.3 e 3.1.4 apresentam os intervalos de confiança, normalizados e absolutos, para as medidas realizadas e a variância do valor médio para um nível de confiança de 95%, nos casos de variância conhecida (distribuição normal) e desconhecida (distribuição t de Student).

Número de amostras	Intervalo de confiança.	dn/2	d/2	$\frac{\sigma^2}{\bar{v}}$
1	[3.8 , 16.2]	1.96	6.20	10.00
10	[8.0 , 12.0]	1.96	1.96	1.00
100	[9.4 , 10.6]	1.96	0.62	0.10
1000	[9.8 , 10.2]	1.96	0.196	0.01

Tabela 3.1.3. Intervalos de confiança para σ^2 conhecido.

Número de amostras	Intervalo de confiança.	dn/2	d/2	$\frac{\sigma^2}{\bar{v}}$
1	[0.0 , 40.0]	12.71	40.19	10.00
10	[7.8 , 12.2]	2.23	2.23	1.00
100	[9.4 , 10.6]	1.98	0.63	0.10
1000	[9.8 , 10.2]	1.96	0.196	0.01

Tabela 3.1.4. Intervalos de confiança para σ^2 desconhecido, supondo-se que $S^2 = 10.00$.

O comprimento dos subintervalos deve ser escolhido de forma que, mesmo havendo uma dependência entre o final de um subintervalo e o início de outro, a dependência entre subintervalos seja desprezível. Pritsker [PRITSKER 31] sugere o uso de um estimador apresentado por Fishman para o coeficiente de autocorrelação entre subintervalos consecutivos:

$$C = 1 - \frac{\sum_{b=1}^{N-1} (\bar{v}_b - \bar{v}_{(b+1)})^2}{2 \sum_{b=1}^N (\bar{v}_b - \bar{v})^2} \quad (3.1.20.)$$

3.2. - Linguagens de Simulação.

Linguagens para simulação a eventos discretos tem sido desenvolvidas em grande número. A literatura apresenta as linguagens GPSS e SIMSCRIPT como as mais largamente utilizadas [GORDON 16]. Em 1979 foi introduzida a linguagem SLAM, desenvolvida a partir de conceitos das linguagens Q-GERT e GPSS. Esta linguagem permite a simulação a eventos discretos e contínuos. No caso de eventos discretos apresenta uma grande facilidade de implementação, sem exigir do projetista um extenso conhecimento de programação [PEGDEN 30].

3.2.1. - Linguagem Slam.

A linguagem SLAM (Simulation Language for Alternative Modeling) foi desenvolvida em FORTRAN por A. Pristker e C. D. Pedgen e divulgada em 1979 [PEGDEN 30]. O SLAM permite a criação de modelos de simulação contínua ou a eventos discretos. É fornecido um pacote de subrotinas e funções em FORTRAN para geração de amostras de variáveis aleatórias, entrada e saída de dados e controle da simulação. O usuário utiliza o pacote para criar seus modelos de simulação, escrevendo um programa em FORTRAN.

Para a simulação de modelos a eventos discretos é possível, alternativamente, utilizar o modo rede (network), que pode ser definido como um modo interpretado. Neste caso o modelo é definido em um arquivo texto como uma rede de filas e servidores, a ser percorrida pelos usuários. Um programa executivo interpreta a rede e realiza a simulação.

No modo rede a simulação é mais lenta do que no modo compilado. No entanto permite a descrição de um modelo de forma simples, evitando o desenvolvimento de um programa. Esta característica diferencia o SLAM de outras linguagens, tornando-o adequado aos casos em que o

tempo de execução é secundário em relação ao tempo de elaboração do modelo. Isto torna a linguagem atrativa nos casos de validação de outros modelos ou no caso de projetos didáticos [ARCHER 02].

3.2.2. Descrição de Modelos em SLAM.

O pacote SLAM é constituído por 3 arquivos executáveis e uma série de arquivos tipo biblioteca. O usuário deve criar um arquivo texto com a descrição da rede (network) a ser simulada. O primeiro arquivo executável (INPUT) irá corrigir e traduzir o arquivo texto para um arquivo intermediário de entrada. O segundo arquivo executável (SLAM) realiza a simulação propriamente dita e gera um arquivo intermediário de saída. O último arquivo executável (OUTPUT) apresenta os resultados da simulação.

A linguagem SLAM no modo rede é voltada para simulação de redes de filas. Muitos problemas, tais como: o atendimento ao público (hospitais, etc) ou redes de telecomunicações, podem ser representados desta forma.

A rede é constituída por dois tipos de elementos básicos: Nós e atividades. As atividades representam a execução de alguma ação com um certo tempo de duração. Os nós representam filas ou tarefas como decisões, atribuição de valores à variáveis e coleta de dados.

São definidas uma série de variáveis e funções que podem ser utilizadas como parâmetros de simulação. Por exemplo há funções que a cada chamada fornecem uma amostra de uma variável aleatória com uma certa distribuição desejada. Esta amostra pode ser utilizada para determinar o tempo de serviço de um usuário.

3.2.3. Modelo de Descrição de Redes Telefônicas.

A seguir é descrito um modelo de simulação de redes telefônicas

utilizando a linguagem SLAM no modo rede. A estrutura utilizada é modular e pode ser aplicada a uma rede telefônica genérica.

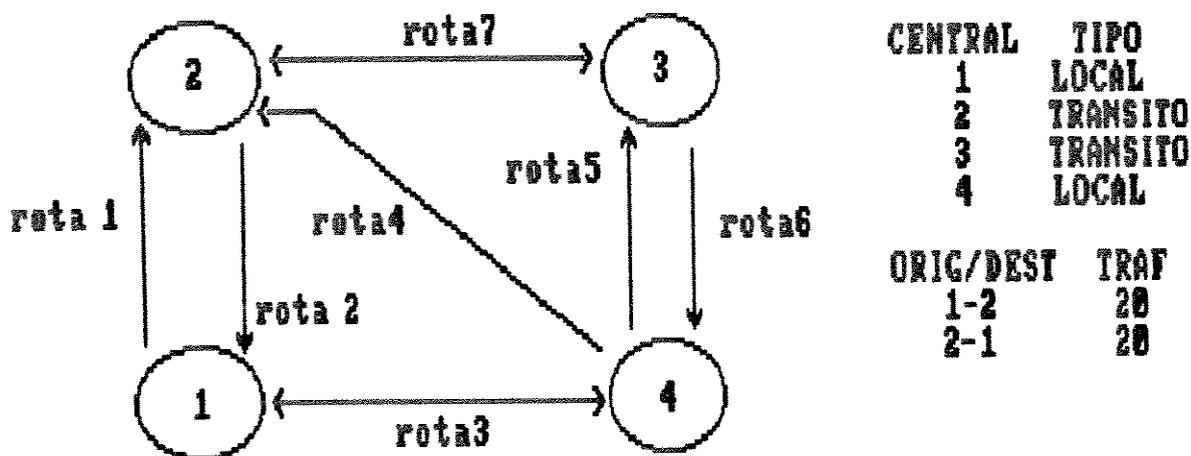


Figura 3.2.1. - Rede utilizada como exemplo de modelamento de redes telefônicas utilizando o pacote SLAM.

Cada rota é definida como um conjunto de recursos. O encaminhamento de chamadas é feito por atividades, que direcionam a chamada para uma dada rota apenas no caso de haver juntores disponíveis. Isto permite contar o número de chamadas cursadas ou bloqueadas em cada rota. Após ocupar os recursos até o destino, o evento é tratado por uma fila do tipo M/M/∞ (na verdade M/M/k com k suficientemente grande). Após o serviço nesta fila há um mecanismo para liberação dos recursos. Cada evento possui um conjunto de

atributos onde são armazenados o número de rotas utilizadas pela chamada e suas identidades.

A figura 3.2.1. apresenta um diagrama da topologia da rede exemplo simulada. A técnica de encaminhamento empregada é a de transbordo. Este mesmo tipo de estrutura de programação permite modelar redes que utilizem a técnica de repartição de carga.

```

GEN,BUDRI,REDE 3.2.1,12/22/89;
LIMITS,10,15,500;
NETWORK;
    RESOURCE/ROTA1(15),3;           Definição das rotas
    RESOURCE/ROTA2(20),5;
    RESOURCE/ROTA3(10),2,8;
    RESOURCE/ROTA4(10),9;
    RESOURCE/ROTA5(10),10;
    RESOURCE/ROTA6(30),6;
    RESOURCE/ROTA7(20),4,7;
N1      CREATE,EXPON(6.);           Chamadas geradas no nó 1
      ASSIGN,TRIB(4)=5;
N1E1    GOON;                       encaminhamento 1 do nó 1
      ACT,,NMRSC(ROTA3).LE.0,N1E2;   Rota 3 bloqueada, tenta rota 1
      ACT,,NMRSC(ROTA3).GT.0,;       Rota 3 disponível
      AWAIT(2/1),ROTA3/1,,;          Ocupa junção da rota 3
      ASSIGN,II=TRIB(4),TRIB(II)=3,TRIB(4)=TRIB(4)+1;
      ACT,,TRATA;                     Registra que chamada ocupou a rota 3 e cursa a ch.
N1E2    GOON;                       Encaminhamento 2 do nó 1
      ACT,,NMRSC(ROTA1).LE.0,BLOQ;   Rota 1 bloqueada, ch. bloqueada
      ACT,,NMRSC(ROTA1).GT.0,;       Rota 1 disponível
      AWAIT(3/1),ROTA1/1,,;          ocupa rota 1
      ASSIGN,II=TRIB(4),TRIB(II)=1,TRIB(4)=TRIB(4)+1;
      ACT,,N2E1;                       Registra rota 1 e vai para o nó 2
N2E1    GOON;                       encaminhamento 1 do nó 2
      ACT,,NMRSC(ROTA7).LE.0,BLOQ;
      ACT,,NMRSC(ROTA7).GT.0,;
      AWAIT(4/1),ROTA7/1,,;
      ASSIGN,II=TRIB(4),TRIB(II)=7,TRIB(4)=TRIB(4)+1;
      ACT,,N3E1;
N2E2    GOON;                       Encaminhamento 2 do nó 2
      ACT,,NMRSC(ROTA2).LE.0,BLOQ;
      ACT,,NMRSC(ROTA2).GT.0,;
      AWAIT(5/1),ROTA2/1,,;
      ASSIGN,II=TRIB(4),TRIB(II)=2,TRIB(4)=TRIB(4)+1;
      ACT,,TRATA;
N3E1    GOON;                       Encaminhamento 1 do nó 3
      ACT,,NMRSC(ROTA6).LE.0,BLOQ;
      ACT,,NMRSC(ROTA6).GT.0,;
      AWAIT(6/1),ROTA6/1,,;
      ASSIGN,II=TRIB(4),TRIB(II)=6,TRIB(4)=TRIB(4)+1;
      ACT,,TRATA;
N3E2    GOON;                       Encaminhamento 2 do nó 3
      ACT,,NMRSC(ROTA7).LE.0,BLOQ;
      ACT,,NMRSC(ROTA7).GT.0,;
    
```

```

    AWAIT(7/1),ROTA7/1,,;
    ASSIGN,II=ATRIB(4),ATRIB(II)=7,ATRIB(4)=ATRIB(4)+1;
    ACT,,N2E2;
N4      CREATE,EXPON(6.);           Chamadas geradas no nó 4
    ASSIGN,ATRIB(4)=5;
N4E1    GOON;                       Encaminhamento 1 do nó 4
    ACT,,NNRSC(ROTA3).LE.0,N4E2;
    ACT,,NNRSC(ROTA3).GT.0,;
    AWAIT(8/1),ROTA3/1,,;
    ASSIGN,II=ATRIB(4),ATRIB(II)=3,ATRIB(4)=ATRIB(4)+1;
    ACT,,TRATA;
N4E2    GOON;                       Encaminhamento 2 do nó 4
    ACT,,NNRSC(ROTA4).LE.0,N4E3;
    ACT,,NNRSC(ROTA4).GT.0,;
    AWAIT(9/1),ROTA4/1,,;
    ASSIGN,II=ATRIB(4),ATRIB(II)=4,ATRIB(4)=ATRIB(4)+1;
    ACT,,N2E2;
N4E3    GOON;                       Encaminhamento 3 do nó 4
    ACT,,NNRSC(ROTA5).LE.0,BLOQ;
    ACT,,NNRSC(ROTA5).GT.0,;
    AWAIT(10/1),ROTA5/1,,;
    ASSIGN,II=ATRIB(4),ATRIB(II)=5,ATRIB(4)=ATRIB(4)+1;
    ACT,,N3E2;
TRATA   QUEUE(1),,0,BALK(PERDA);   Fila M/M/K
    ACT(500)/1,EXPON(120.),,;
LIBER   ASSIGN,ATRIB(4)=ATRIB(4)-1,II=ATRIB(4);  Liberação das chamadas
    ACT,,II.LT.5,FIM;
    ACT,,II.GE.5,;
    GOON;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.1,ROT1;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.2,ROT2;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.3,ROT3;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.4,ROT4;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.5,ROT5;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.6,ROT6;
    ACT,,ATRIB(II).EQ.7,ROT7;
ROT1    FREE,ROTA1/1;
    ACT,,LIBER;
ROT2    FREE,ROTA2/1;
    ACT,,LIBER;
ROT3    FREE,ROTA3/1;
    ACT,,LIBER;
ROT4    FREE,ROTA4/1;
    ACT,,LIBER;
ROT5    FREE,ROTA5/1;
    ACT,,LIBER;
ROT6    FREE,ROTA6/1;
    ACT,,LIBER;
ROT7    FREE,ROTA7/1;
    ACT,,LIBER;
FIM     GOON;
    TERM,1000;
BLOQ    GOON;                       Contabiliza chamadas bloqueadas
    ACT/2,,LIBER;
PERDA   TERM,;                       Aborto da simulação no caso de transbordo
    ENDNET;                           da fila M/M/K
FIN;

```

Os resultados da simulação são apresentados a seguir e indicam que foram cursadas 850 chamadas e bloqueadas 150. O tráfego cursado em cada rota é apresentado na coluna average utility.

S L A M I I S U M M A R Y R E P O R T

SIMULATION PROJECT REDE 3.2.1

BY BUDRI

DATE 12/22/1989

RUN NUMBER 1 OF 1

CURRENT TIME .3117E+04

STATISTICAL ARRAYS CLEARED AT TIME .0000E+00

REGULAR ACTIVITY STATISTICS

ACTIVITY INDEX/LABEL	AVERAGE UTILIZATION	STANDARD DEVIATION	MAXIMUM UTIL	CURRENT UTIL	ENTITY COUNT
2	.0000	.0000	1	0	150

SERVICE ACTIVITY STATISTICS

ACT NUM	ACT START	LABEL OR NODE	SER CAP	AVERAGE UTIL	STD DEV	CUR UTIL	AVERAGE BLOCK	MAX TME/SER	IDL TME/SER	MAX BSY	ENT CNT
1	TRAT	QUEUE	500	34.982	4.91	36	.00	500.00	40.00	850	

RESOURCE STATISTICS

RESOURCE NUMBER	RESOURCE LABEL	CURRENT CAPACITY	AVERAGE UTIL	STANDARD DEVIATION	MAXIMUM UTIL	CURRENT UTIL
1	ROTA1	15	11.98	2.723	15	12
2	ROTA2	20	13.35	3.445	20	14
3	ROTA3	10	9.65	.747	10	10
4	ROTA4	10	8.66	1.782	10	9
5	ROTA5	10	4.69	2.381	10	5
6	ROTA6	30	11.98	2.723	15	12
7	ROTA7	20	16.67	3.431	20	17

3.3. - Simulador de Redes Telefônicas.

O programa simulador de redes telefônicas (SIMTRAF) é um programa de simulação a eventos discretos, especializado em redes telefônicas e tem como objetivo calcular o tráfego cursado e as probabilidades de bloqueio em uma rede telefônica. Foi desenvolvido em linguagem C, o que lhe confere total portabilidade.

O SIMTRAF foi desenvolvido para permitir a validação de modelos analíticos de redes telefônicas e permitir o estudo de pequenas redes.

3.3.1 Estrutura Funcional.

A figura 3.3.1. apresenta uma descrição funcional do programa. O algoritmo se baseia numa fila de eventos (calendário) ordenados cronologicamente. A simulação consiste em executar seqüencialmente os eventos. Cada evento executado pode gerar outros eventos que são introduzidos no calendário.

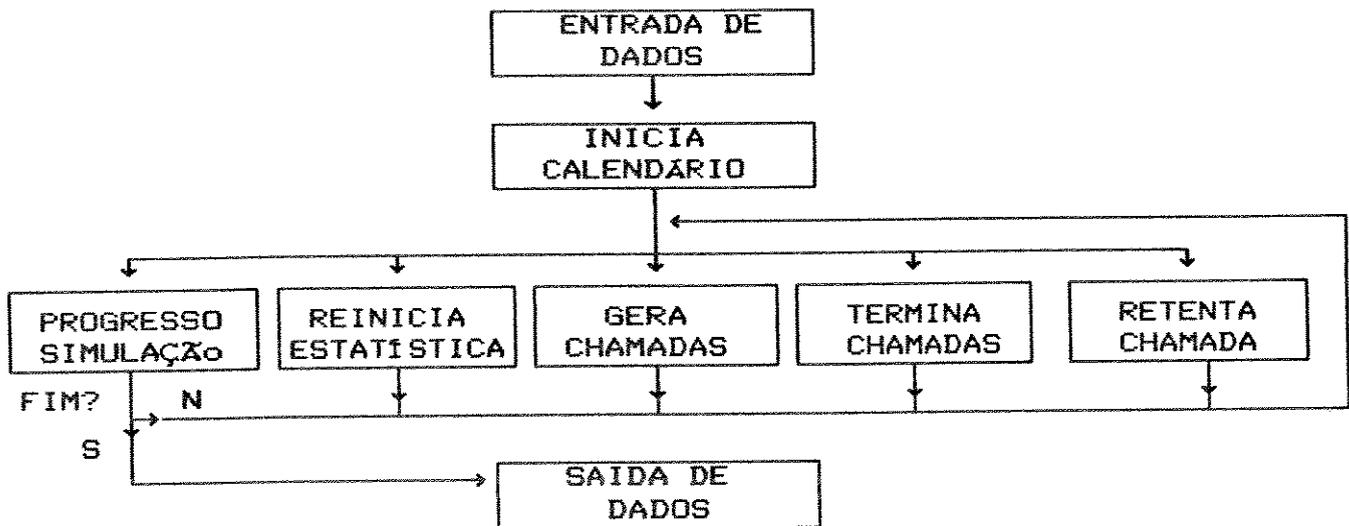


Figura 3.3.1. - Descrição funcional do programa SIMTRAF.

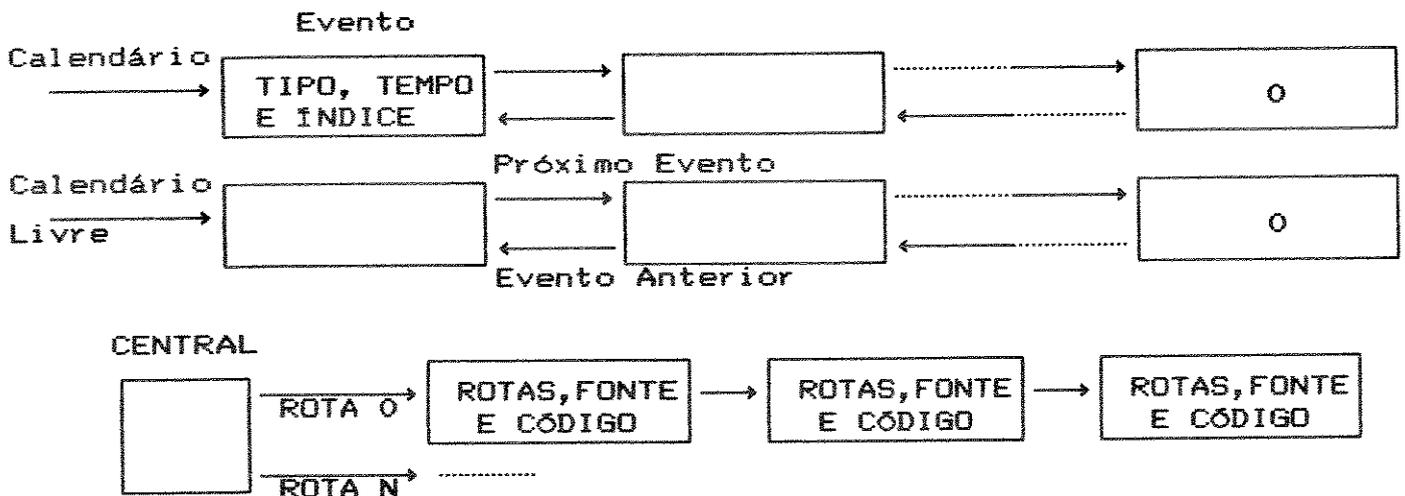


Figura 3.3.2. - Estrutura do calendário e registro de chamadas.

A figura 3.3.2. apresenta a estrutura do calendário. É uma lista ligada onde cada célula identifica o tipo de evento, um índice para

utilização de outras tabelas e um registro de tempo que indica o instante de ocorrência do evento. Há uma lista auxiliar onde são colocadas as células livres.

Os tipos de eventos são:

- Gerar uma chamada. Indica que deve ser gerada uma chamada. O índice determina qual a fonte de tráfego que deve gerar a chamada. As fontes de tráfego geram eventos a intervalos de tempo aleatórios com distribuição exponencial.

O código da chamada é escolhido aleatoriamente de acordo com o seu tráfego. Este artifício permite manter o calendário com um número reduzido de eventos, aumentando a eficiência do algoritmo. Se a chamada for bem sucedida é criado um registro em uma lista de conexões. Há uma lista para cada rota de saída de cada central. A conexão é introduzida na lista correspondente à rota de saída pertencente à central de origem da chamada. Cada registro possui as rotas percorridas pela chamada, a fonte de tráfego e o código da chamada. A posição do registro na lista é escolhida aleatoriamente. No caso de chamadas bem sucedidas também é colocado no calendário o registro do evento término de chamadas.

Os tempos de retenção das chamadas são aleatórios com distribuição exponencial. O processo de término das chamadas é um processo sem memória como mostrado na equação 3.3.2.

$$\text{Prob} \{T > t\} = \exp(-t / t_m) \quad (3.3.1.)$$

$$\begin{aligned} \text{Prob} \{T > t + \tau \mid T > t\} &= \frac{\exp[-(t + \tau) / t_m]}{\exp(-t / t_m)} \\ &= \exp(-\tau / t_m) \\ &= \text{Prob} \{T > \tau\} \end{aligned} \quad (3.3.2.)$$

Portanto o modelo de rede é markoviano e as chamadas em conversação podem ser agrupadas em conjuntos. Para cada conjunto pode-se definir a variável aleatória tempo entre termos de chamadas, que tem distribuição exponencial e valor médio dependente do número de chamadas em curso.

Pode-se, portanto, manter no calendário apenas o instante de término da primeira chamada. No encerramento de cada chamada pode ser calculado o próximo instante de encerramento. Assim, no calendário, é mantido apenas um registro por central de origem.

- Terminar uma chamada. Indica o término de uma chamada em uma dada central de origem, assinalada pelo índice do registro do evento. É escolhida aleatoriamente uma rota de saída, de forma proporcional ao número de chamadas originadas em curso em cada uma delas, e encerrada a primeira chamada da lista de conexões correspondente. Como as chamadas são posicionadas aleatoriamente nestas filas, o processo é equivalente a escolher aleatoriamente uma chamada originada naquela central.

- Retentativa de chamadas. As chamadas mal sucedidas são retentadas com uma certa probabilidade. Esta retentativa é feita após um intervalo de tempo aleatório exponencialmente distribuído, de forma semelhante às fontes de tráfego poissonianas. A diferença reside no fato que a taxa de retentativa depende do número de chamadas aguardando retentativa.

- Iniciar estatísticas. Indica que os contadores e totalizadores de tráfego devem ser iniciados naquele instante.

- Progresso da simulação. A simulação é dividida em intervalos. Ao final de cada um deles é coletada uma amostra do bloqueio nas rotas. Ao final da simulação é estimado um intervalo de confiança para o bloqueio em cada rota.

3.3.2. Aspectos Estatísticos.

O gerador pseudo-aleatório utilizado no programa é do tipo congruente misto e utiliza a seguinte equação recursiva:

$$U_{k+1} = (65541 * U_k + 858993459) \text{ Mod } 2^{32} \quad (3.3.3.)$$

As amostras para os diversos processos do algoritmo são obtidas a partir do método da transformada inversa.

A cada geração de chamadas são incrementados contadores para chamadas bem sucedidas e mal sucedidas. A partir destes contadores são obtidas as probabilidades de bloqueio. Existem contadores por rota, por central, por fonte de tráfego e ponto a ponto. No caso de bloqueio nas rotas são coletadas medidas para determinação do intervalo de confiança.

A simulação é dividida em intervalos. O intervalo inicial é utilizado para permitir que o sistema entre em regime estacionário. Os contadores e totalizadores são inicializados e nos intervalos seguintes são incrementados. Ao final de cada intervalo é coletada uma amostra da probabilidade de bloqueio para cada rota. Ao final da simulação é obtida uma estimativa da média, da variância e do coeficiente de correlação destas amostras.

A partir destas estimativas, é determinado o intervalo de confiança com o auxílio de uma tabela de valores da distribuição t de Student para um nível de confiança de 95%.

No início e término de cada chamada é contabilizado nos totalizadores os tráfegos cursados por rota, por fonte, por central e ponto a ponto. Também é totalizado o quadrado do tráfego, que permite o cálculo da variância do tráfego no final da simulação, como mostra a equação 3.3.4.

$$\sigma^2 = \overline{v^2} - \bar{v}^2 = \sum_{b=1}^N v_b^2 / N - \left[\sum_{b=1}^N v_b / N \right]^2 \quad (3.3.4.)$$

Quando se utiliza o método de processamento em subintervalos para simulações, é preciso que os intervalos tenham uma duração tal que a correlação entre intervalos seja pequena para garantir a validade dos intervalos de confiança determinados.

No caso de simulação de redes telefônicas, pode-se avaliar a duração necessária de um intervalo a partir do estudo da função de autocorrelação para uma fila com infinitos servidores, serviço exponencial e chegadas poissonianas.

O coeficiente de autocorrelação é definido por:

$$\rho_x(\tau) = \text{cov}_x(\tau) / \sqrt{\sigma_x^2(t_1) \cdot \sigma_x^2(t_2)} \quad (3.3.5.)$$

Onde $\text{cov}_x(\tau)$ é a covariância e $\sigma_x^2(t)$ é a variância de X.

Para uma fila estacionária com tráfego oferecido A e infinitos servidores tem-se $\sigma_x^2(t) = A$.

Portanto o coeficiente de autocorrelação pode ser definido como:

$$\rho_x(\tau) = \text{cov}_x(\tau) / A \quad (3.3.6.)$$

A covariância pode ser expressa a partir da autocorrelação e da esperança de X:

$$\text{cov}_x(\tau) = R_x(\tau) - \bar{x}^2 = R_x(\tau) - A^2 \quad (3.3.7.)$$

$$\rho_x(\tau) = [R_x(\tau) - A^2] / A \quad (3.3.8.)$$

Onde $R_x(\tau) = E\{x(t) \cdot x(t+\tau)\}$.

Para valores suficientemente pequenos de $\tau = \Delta t$ pode ocorrer apenas uma transição, com a chegada ou partida de uma chamada.

$$R_x(\Delta t) = \sum_n n \cdot \left[\sum_k k \cdot \text{Prob}\{k|n\} \right] \cdot \text{Prob}\{n\} \quad (3.3.9.)$$

Onde $k \in \{ n-1, n, n+1 \}$,

$$k = x(t+\Delta t)$$

$$n = x(t)$$

Tem-se então:

$$\text{Prob}\{n-1|n\} = 1 - \text{Prob}\{t > \Delta t\} = 1 - \exp(-n \cdot \mu \cdot \Delta t) \cong n \cdot \mu \cdot \Delta t.$$

$$\text{Prob}\{n+1|n\} = \Delta t \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta t) \cong \lambda \cdot \Delta t.$$

$$\text{Prob}\{n|n\} = \exp(-n \cdot \mu \cdot \Delta t) \cdot \exp(-\lambda \cdot \Delta t) \cong 1 - (n\mu + \lambda) \cdot \Delta t.$$

Utilizando estes resultados em (3.3.9) tem-se:

$$R_x(\Delta t) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left[(n-1) \cdot n \cdot \mu \cdot \Delta t + n \cdot [1 - (n \cdot \mu + \lambda) \Delta t] + (n+1) \cdot \lambda \cdot \Delta t \right] \cdot \text{Prob}\{n\}$$

$$R_x(\Delta t) = \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot \text{Prob}\{n\} + \Delta t \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \left[(n-1)n \cdot \mu - n \cdot (n \cdot \mu + \lambda) \right] + (n+1) \cdot \lambda \cdot \text{Prob}\{n\}$$

$$R_x(\Delta t) = \overline{x^2} - \Delta t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [n^2 \cdot \mu - n \cdot \lambda] \cdot \text{Prob}\{n\}$$

Mas $\overline{x^2} = A^2 + A$, portanto:

$$R_x(\Delta t) = A^2 - A - \Delta t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} [n^2 \cdot \mu - n \cdot \lambda] \cdot \text{Prob}\{n\} \quad (3.3.10.)$$

De (A3.3.8) e (3.3.10) tem-se:

$$p_x(\Delta t) = 1 - \frac{\Delta t}{A} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (n^2 \cdot \mu - \lambda \cdot n) \cdot \text{Prob}\{n\}$$

$$\rho_x(\Delta t) = 1 - \frac{\Delta t}{A} \cdot \left[\mu \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot \text{Prob}(n) - \lambda \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \text{Prob}(n) \right]$$

$$\rho_x(\Delta t) = 1 - \frac{\Delta t}{A} \cdot \left[\mu(A^2 + A) - \lambda \cdot A \right] = 1 - \mu \Delta t \quad (3.3.11.)$$

Portanto para τ pequeno a função de coeficiente de autocorrelação decresce com $\mu \cdot \tau$ e pode-se estimar que as amostras do tráfego são praticamente não correlacionadas depois de um intervalo de $5 \cdot (1/\mu)$, isto é depois de 5 vezes o tempo médio de retenção de chamadas.

AUTOCORRELAÇÃO FILA M/M/30/30
A = 20.3 TEMPO MEDIO DE RETENÇÃO = 240

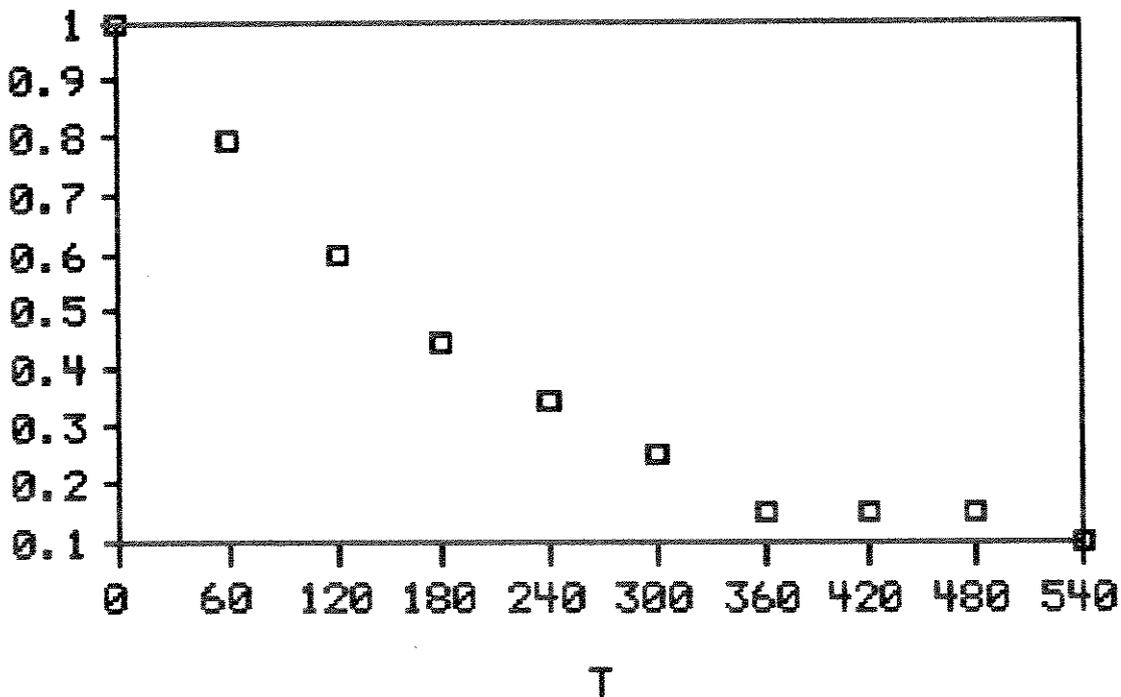


Figura 3.3.3. - Coeficiente de autocorrelação obtido para uma simulação de uma rota com 30 circuitos e tráfego oferecido de 20.3 Erlangs.

O gráfico da figura 3.3.3. apresenta o resultado da simulação de uma rota com 30 circuitos e um tráfego oferecido poissoniano de 20.3 Erlang (fila M/M/30/30). Foram obtidos os coeficientes de autocorrelação para alguns valores discretos de tempo. O tempo médio de retenção considerado foi de 240 segundos. Cada ponto foi obtido a partir de 10.000 amostragens.

3.4. Conclusões.

O simulador de eventos discretos SIMTRAF, especializado em redes telefônicas foi apresentado neste capítulo. A duração das chamadas e o tempo entre chegadas foram modelados como variáveis aleatórias de distribuição exponencial. Isto permitiu uma representação agregada das chamadas em conversação, reduzindo a necessidade de memória quando comparada com a simulação a eventos discretos convencional.

O programa SIMTRAF constitui-se em uma ferramenta computacional acabada para a simulação a eventos discretos de redes telefônicas. Sua principal característica é tratar variadas estruturas topológicas (hierárquicas ou não) e de encaminhamento (transbordo, repartição de carga, etc.).

Para efeito de comparação foi apresentada a linguagem SLAM para simulação de sistemas e desenvolvido um modelo para redes telefônicas baseada nesta linguagem.

O programa SIMTRAF foi desenvolvido em linguagem C, o que lhe confere grande portabilidade, e originalmente concebido para utilização em microcomputadores. Mesmo redes de médio porte podem ser simuladas neste ambiente embora o tempo de execução seja um fator limitante. Esta limitação foi sensivelmente reduzida através de sua adaptação para as estações de trabalho.

Uma das peças chave de um simulador a eventos discretos é o seu

calendário, que possui uma estrutura não convencional, baseada nas propriedades ergódicas do tráfego telefônico. As chamadas são agrupadas em conjuntos que reduzem a exigência de memória e melhoram o processo de pesquisa no calendário.

O programa SIMTRAF utiliza o método de simulação em intervalos. A cada intervalo são obtidas amostras da probabilidade de bloqueio nas rotas. A partir destas amostras é obtido o intervalo de confiança dos resultados para um nível de confiança de 95% e estimado a correlação entre intervalos. Esta abordagem exige do usuário a especificação do número de intervalos e do seu tempo de duração para que os seguintes requisitos sejam satisfeitos:

O número de intervalos deve permitir uma convergência dos estimadores de variância e correlação. Verificou-se experimentalmente que o número de intervalos deve ser superior a 30 e tipicamente igual a 50.

O tempo de duração dos intervalos deve garantir que a correlação entre intervalos seja desprezível e que para cada rota ocorra em cada intervalo pelo menos de 5 a 10 chamadas bloqueadas. Verificou-se que a duração de um intervalo deve ser superior a 10 vezes o tempo de retenção das chamadas.

CAPÍTULO 4. - MODELO ANALITICO.

Este capítulo apresenta o aplicativo computacional ANATRAF para cálculo de probabilidades de bloqueio em redes telefônicas. São apresentadas as características do tráfego telefônico e os resultados da aplicação de três metodologias de modelamento analítico para o tráfego telefônico: modelo markoviano, modelo equivalente de Wilkinson e modelo de Erlang invertido.

4.1.1. Introdução.

Um modelo analítico é uma representação de um sistema com técnicas que utilizam apenas argumentos da teoria matemática. No caso de redes telefônicas, o modelo analítico consiste de um conjunto de equações que permite o cálculo dos parâmetros de tráfego a partir da topologia da rede, do tráfego oferecido e do plano de encaminhamento. Neste capítulo são apresentados alguns modelos para o cálculo das probabilidades de bloqueio nas redes telefônicas.

Quando o telefone foi inventado, em 1876, era apenas um meio de comunicação ponto a ponto entre dois terminais. Rapidamente surgiu a comutação telefônica permitindo a interligação entre vários terminais.

Em 1878 foi instalada a primeira central telefônica comercial interligando 21 assinantes, posteriormente surgiram as redes telefônicas locais, as redes interurbanas e o encaminhamento automático. Este desenvolvimento foi fundamentado no fato de que a comutação telefônica permite interligar vários assinantes, diminuindo seus custos de comunicação. Esta economia é baseada no melhor aproveitamento dos circuitos telefônicos reduzindo seus tempos ociosos. Em contrapartida prejudica-se o desempenho do ponto de vista

do usuário, permitindo-se que haja um certo bloqueio de chamadas na rede telefônica.

O tráfego telefônico oferecido à rede é aleatório devido ao comportamento dos assinantes. Em geral este tráfego é modelado como uma variável aleatória com distribuição de Poisson.

Se um conjunto de assinantes for interligado a um dispositivo de comutação que concentre o tráfego para um número limitado de circuitos N , menor que o número de assinantes, haverá congestionamento.

Do ponto de vista econômico, deseja-se que N seja tal que os circuitos permaneçam ocupados todo o tempo, para que haja o máximo aproveitamento de cada circuito. Neste caso é bem provável que os assinantes tentem estabelecer um número maior que N de chamadas simultâneas. As tentativas quando existirem N chamadas em curso sofrerão ou um processo de espera por um circuito vago ou um processo de bloqueio, de acordo com a filosofia empregada na rede. Do ponto de vista da qualidade de serviço para o usuário deseja-se que a probabilidade de espera ou bloqueio seja a menor possível, o que implica na existência de muito mais circuitos. O planejamento telefônico, do ponto de vista de engenharia de tráfego, consiste no dimensionamento com custo mínimo dos circuitos telefônicos adotando critérios de desempenho mínimo quanto aos processos de espera e de bloqueio.

O processo de estabelecimento de uma chamada exige um certo conjunto de recursos da rede. A partir do terminal do assinante é preciso um circuito que interligue o assinante à central telefônica de origem e um circuito entre cada central que compõe a cadeia de comutação até o assinante de destino.

Em cada central, é preciso alocar canais internos e órgãos de sinalização e controle da chamada. Em geral os órgãos internos não são

utilizados durante o tempo total da duração da chamada, mas apenas na fase de estabelecimento (ocupação da ordem de segundos). Neste caso a alocação utiliza o processo de espera, onde uma chamada que encontre todos os órgãos ocupados aguarda por uma liberação. No caso de recursos que tenham um tempo de ocupação relativamente longo (da ordem de minutos) utiliza-se o processo de bloqueio, onde uma chamada que encontre todos recursos ocupados é prematuramente terminada.

No caso de redes telefônicas, os órgãos internos às centrais são dimensionados de forma a produzir um mínimo efeito sobre o tráfego telefônico. Assim, o tráfego telefônico pode ser tratado de forma simplificada, considerando-se apenas o estabelecimento de chamadas nos circuitos que interligam as centrais de comutação.

4.1.2. Características do Tráfego Telefônico.

O tráfego telefônico é definido pelo processo de estabelecimento de chamadas pelos usuários da rede telefônica. Este tráfego pode ser caracterizado como um tráfego oferecido ou como um tráfego cursado. O primeiro se caracteriza pelas tentativas de estabelecimento num dado ponto da rede, enquanto o segundo se refere apenas às chamadas bem sucedidas.

O tráfego telefônico é um processo estocástico, em geral representado pela variável aleatória correspondente ao número de chamadas estabelecidas em um dado instante. A esperança matemática desta variável é chamada de intensidade de tráfego. A intensidade de tráfego é expressa pela unidade adimensional Erlang em homenagem a Agner Krarup Erlang (1878-1929). Erlang trabalhou na companhia telefônica de Copenhague e foi o pioneiro no estudo da teoria do tráfego telefônico. Publicou em 1909 "A Teoria das Probabilidades e as Conversações Telefônicas" e em 1917 "Solução de alguns Problemas de

Significância em Centrais Telefônicas Automáticas" onde apresenta a fórmula de bloqueio que leva seu nome [ELLDIN 10]).

Os primeiros trabalhos no estudo do tráfego telefônico [MOLINA 28] apresentam dados experimentais sobre dois parâmetros fundamentais: O intervalo de tempo entre o estabelecimento de duas chamadas consecutivas e o tempo de duração das chamadas. Estes trabalhos mostraram que estes parâmetros podem ser modelados como variáveis aleatórias, independentes entre si, com distribuição de probabilidade exponencial negativa e independentes do número de chamadas estabelecidas. Esta distribuição particular facilita o tratamento matemático do modelo, além de concordar com boa aproximação com os dados experimentais.

É possível demonstrar que um tráfego com estas características (para um número de recursos infinitos na rede) apresenta uma distribuição de Poisson para o número de chamadas estabelecidas. Este tipo de tráfego é dito poissoniano [KLEINROCK 18].

$$P_k(t) = A^k \cdot \exp(-A) / k!$$

Onde:

$P_k(t)$ = Probabilidade de haver k chamadas estabelecidas no instante t.

$A = E\{k\}$ = Intensidade do tráfego telefônico.

Uma das hipóteses implícitas para este modelo é a existência de infinitas fontes de tráfego, de forma que seja possível estabelecer k chamadas, para k tão grande quanto se queira.

Caso o número de fontes de tráfego seja finito, conforme as chamadas vão se estabelecendo o número de fontes capazes de iniciar uma nova chamada é reduzido. Desta forma o tempo médio entre o aparecimento de novas chamadas aumenta com k. Isto invalida as

hipóteses de um tráfego poissoniano. O tráfego nestas condições pode ser modelado pela distribuição de Engset [KLEINROCK 18].

$$P_k(t) = \frac{\binom{M}{k} \cdot a^k}{\sum_{i=0}^M \binom{M}{i} \cdot a^i}$$

Onde:

$P_k(t)$ = Probabilidade de haver k chamadas estabelecidas no instante t .

a = Intensidade do tráfego telefônico para cada fonte (Fator de ocupação de cada fonte).

M = Número de fontes de tráfego.

A distribuição de Engset iguala-se à distribuição de Poisson quando M tende para o infinito.

Em geral, o número de assinantes é muito superior ao número de circuitos disponíveis na rede. Assim, o número típico de assinantes ocupados para uma rede telefônica é da ordem de 10% do número total de assinantes, ou seja, o tráfego originado mais o tráfego terminado em uma dada região é da ordem de 0.1 Erlang por assinante.

Outro aspecto implícito no modelo de tráfego poissoniano é o comportamento dos assinantes frente ao congestionamento da rede. O modelo poissoniano supõe que as chamadas mal sucedidas são eliminadas e não influenciam, no futuro, o processo de tentativas de estabelecimento de chamadas. Na prática, no entanto, se um assinante realizar uma tentativa mal sucedida, ele irá realizar retentativas até obter sucesso ou então desistir. Se o congestionamento na rede for elevado este processo poderá causar distorções não previstas pelo modelo poissoniano.

4.1.3. Modelo Markoviano.

O modelo de Markov é utilizado no estudo de processos estocásticos. No caso de sua aplicação em redes telefônicas, o modelo representa a rede de forma global e detalhada, considerando integralmente o funcionamento a nível de cada circuito de cada enlace telefônico. Desta forma as equações obtidas resultam em soluções exatas na determinação das probabilidades de ocupação dos circuitos das redes. Em contrapartida, mesmo para redes de pequeno porte, o modelo exige um grande número de equações e variáveis, inviabilizando sua aplicação prática [LE GALL 25].

Em 1907 A. A. Markov publicou seu trabalho "Extensão dos teoremas de limites da teoria de probabilidades para uma soma de variáveis conectadas em cadeia". Nele Markov definiu o que atualmente é chamado de processo de Markov, uma forma de representar processos estocásticos. A cadeia de Markov é um caso particular em que o processo apresenta estados discretos. A transição entre estados pode ocorrer de forma contínua ou discreta no tempo [KLEINROCK 18].

As cadeias de Markov são processos sem memória. Isto significa que o comportamento do sistema no futuro depende apenas de seu estado presente, sem relação com o tempo transcorrido no passado ou com a sequência de estados percorrida até alcançar o estado atual. O tempo de permanência num dado estado é uma variável aleatória independente do passado.

Para processos contínuos no tempo, a única distribuição que satisfaz tal condição é a distribuição exponencial negativa:

$$P(T > t) = \exp(-t/t_m) \quad (4.1.1)$$

Onde t_m é o tempo médio de permanência no estado.

Como ilustração, seja um cliente atendido num caixa de banco. Ele chega ao caixa no instante 0.

Se o tempo de atendimento for uma variável aleatória uniformemente distribuída entre 0 e $2.T$, no instante t ($0 \leq t \leq 2.T$) o tempo restante de atendimento será uniformemente distribuído entre t e $2.T$, o que é explicitamente dependente do instante t .

Se o tempo de atendimento for exponencialmente distribuído, a função densidade de probabilidade do cliente permanecer no caixa é dada por:

$$p(t) = tm \cdot \exp(-t/tm) \quad (4.1.2)$$

A probabilidade do cliente permanecer além do instante τ é dada por:

$$\begin{aligned} \text{Prob}(T > \tau) &= \int_{\tau}^{\infty} p(t) \cdot dt \\ &= \exp(-\tau/tm) \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

Dado que o cliente está sendo atendido no instante τ , a probabilidade do cliente permanecer por um tempo σ além de τ é dado pela equação (4.1.4.):

$$\begin{aligned} \text{Prob}(T > \tau + \sigma / T > \tau) &= \exp[-(\tau + \sigma)/tm] / \exp(-\tau/tm) \\ &= \exp(-\sigma/tm) \end{aligned} \quad (4.1.4)$$

A equação (4.1.4) mostra que, independentemente do tempo transcorrido no passado, o tempo de permanência no sistema tem sempre a mesma distribuição exponencial.

A figura 4.1.1 mostra uma representação gráfica (estados e transições) de uma cadeia de Markov contínua no tempo.

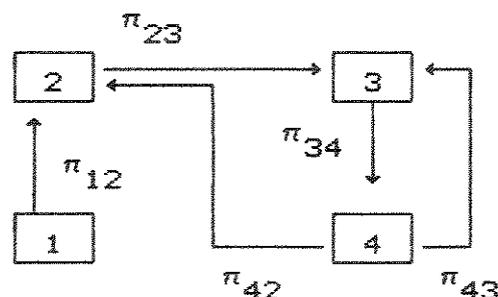


Figura 4.1.1. Representação de uma cadeia de Markov.

O tempo médio entre transições é dado por $1/\pi_{ij}$ que é a taxa de transição do estado i para o estado j .

O comportamento deste sistema pode ser descrito pelas equações:

$$\frac{d}{dt} P_k(t) = -P_k(t) \cdot \sum_{j \neq k} \pi_{kj} + \sum_{j \neq k} P_j(t) \cdot \pi_{jk} \quad (4.1.5)$$

$$\sum_k P_k(t) = 1$$

Onde $P_k(t)$ é a probabilidade do sistema estar no estado k no instante t .

No estudo de processos estocásticos estacionários, freqüentemente é preciso conhecer seu comportamento apenas nas condições de equilíbrio. Neste caso, o sistema é dito em equilíbrio estatístico, ou seja, a probabilidade do sistema alcançar um dado estado é igual a probabilidade de abandoná-lo, de forma que a probabilidade do sistema estar num determinado estado é constante no tempo. Portanto:

$$\frac{d}{dt} P_k(t) = 0$$

$$P_k = \sum_{j \neq k} P_j \cdot \pi_{jk} \cdot \left[\sum_{j \neq k} \pi_{kj} \right]^{-1} \quad (4.1.6.)$$

$$\sum_k P_k = 1$$

$$\text{Onde } P_k = \lim_{t \rightarrow \infty} P_k(t)$$

O tráfego telefônico pode ser descrito como um processo de Markov contínuo no tempo. Os estados são representados pelas combinações possíveis de ocupação de cada rota da rede telefônica. As transições entre estados representam ou o início ou o término de uma chamada; o tempo entre estabelecimento de chamadas e o tempo de duração de chamadas são exponencialmente distribuídos.

Neste caso $1/\lambda_i$ é o tempo médio entre nascimentos e $1/\mu_i$ é o

tempo médio entre términos de chamadas no estado i .

Um exemplo de aplicação das cadeias de Markov no estudo de redes telefônicas é o caso elementar da fórmula de bloqueio de Erlang:

Seja um grupo de m circuitos telefônicos. A este grupo é oferecido um tráfego poissoniano de intensidade A . No tráfego poissoniano o tempo entre chamadas sucessivas é distribuído exponencialmente com taxa constante λ , independente do número de chamadas estabelecidas em um dado instante. As chamadas possuem tempos de retenção exponencialmente distribuídos com média t_m ($t_m = 1/\mu$). Se uma chamada for iniciada e encontrar os m circuitos ocupados ela é bloqueada e eliminada do sistema.

A figura 4.1.2. apresenta o diagrama de estado de um grupo m de circuitos telefônicos.

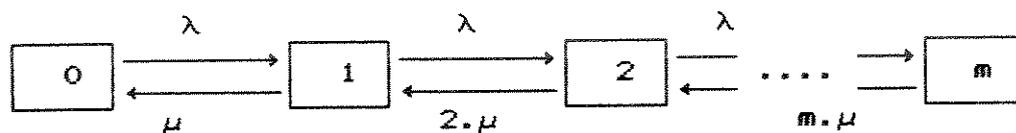


Figura 4.1.2. Diagrama de uma cadeia de Markov de um grupo de m circuitos que cursa um tráfego poissoniano.

Aplicando-se as equações 4.1.6 ao sistema da figura 4.1.2 obtém-se:

$$P_k = \left[\lambda \cdot P_{k-1} + (k+1) \cdot \mu \cdot P_{k+1} \right] \cdot \left[\lambda + k \cdot \mu \right]^{-1}, \quad 0 < k < m$$

$$P_0 = \left[\mu \cdot P_1 \right] \cdot \left[\lambda \right]^{-1}$$

$$P_m = \left[\lambda \cdot P_{m-1} \right] \cdot \left[m \cdot \mu \right]^{-1}$$

Que resulta em:

$$P_k = \frac{1}{k!} \cdot P_0 \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k$$

$$\text{Mas } \sum_{k=0}^m P_k = 1$$

$$\text{Portanto: } P_0 = \left[\sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right]^{-1}$$

$$P_k = \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot \left[\sum_{i=0}^m \frac{1}{i!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i \right]^{-1} \quad (4.1.7)$$

Define-se como probabilidade de bloqueio a razão entre o número de chamadas que não encontram circuitos desocupados e o número total de tentativas, bem ou mal sucedidas, de estabelecimento de chamadas.

A equação 4.1.8 expressa a fórmula de bloqueio de Erlang. A probabilidade de bloqueio neste caso é igual à probabilidade de todos os m circuitos estarem ocupados devido à independência entre os inícios de chamada e o estado do sistema. Assim, a probabilidade de uma chamada encontrar o sistema no estado k é exatamente P_k . O mesmo não ocorre no caso de tráfegos não poissonianos quando o processo de chegada de chamadas e o processo de ocupação de órgãos são correlacionados.

$$P_m = E[A, m] = \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m \cdot \left[\sum_{k=0}^m \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right]^{-1} \quad (4.1.8)$$

A utilização de modelos markovianos para representação de redes telefônicas torna-se rapidamente inviável com o aumento do número de rotas. Deve haver um estado para cada combinação de ocupação possível das várias rotas. O número de estados torna-se demasiadamente grande mesmo para redes de pequeno porte [LE GALL 25].

Assim, foram desenvolvidos modelos aproximados que permitem o estudo de redes telefônicas de porte considerável. Neste trabalho são apresentados dois destes métodos de modelamento: O método do equivalente de Wilkinson e o método de Erlang invertido.

O método do equivalente de Wilkinson permite calcular a

probabilidade de bloqueio de uma rota alternativa que recebe tráfego transbordado de uma ou várias rotas de primeira escolha. O método pode ser estendido para o cálculo da probabilidade de bloqueio para um tráfego genérico, caracterizado por sua média e variância, oferecido a uma rota. Por isto é classificado como um método de dois momentos.

O método de Erlang invertido permite o cálculo da probabilidade de bloqueio de uma rota a partir de equações que se relacionam com o tráfego escoado, utilizando-se a fórmula inversa de Erlang. O modelo é um método de um momento, caracterizando o tráfego apenas por sua média. Este método foi inicialmente proposto por Bonatti [BONATTI 07] e depois desenvolvido por Le Gall [LE GALL 24] para incluir os tráfegos transbordados.

4.1.4. Modelo Equivalente de Wilkinson.

Durante as décadas de 1950 e de 1960, foi introduzido nos Estados Unidos o serviço de discagem direta à distância. Para atender este serviço foi preciso que as centrais telefônicas encaminhassem automaticamente as chamadas. Junto com o encaminhamento automático foi introduzida a técnica de encaminhamento alternativo por transbordo.

O encaminhamento manual era feito por apenas um caminho para cada destino. O cálculo de bloqueio nas rotas era feito utilizando-se a fórmula de Erlang.

O método do equivalente aleatório de Wilkinson [WILKINSON 36] foi desenvolvido para permitir o dimensionamento das rotas alternativas. A fórmula de Erlang supõe que o tráfego oferecido à rota em estudo seja poissoniano. No caso de rotas alternativas, o tráfego oferecido é aquele transbordado das rotas anteriores e conseqüentemente não é poissoniano.

Seja o caso elementar apresentado na figura 4.1.3, na qual estão

representadas duas rotas com $N1$ e NF circuitos, respectivamente.

A rota 1 é oferecido um tráfego poissoniano de intensidade A , se a rota 1 estiver congestionada, o tráfego excedente é transbordado para a rota F . Se as duas rotas estiverem congestionadas, o tráfego é bloqueado.

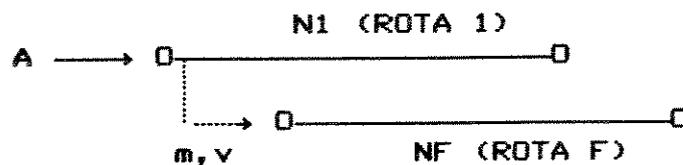


Figura 4.1.3. Caso elementar de encaminhamento com transbordo.

A probabilidade total de bloqueio do tráfego A é dada por:

$$B_T = E[A, N1+NF] \quad (4.1.9.)$$

A média e a variância do tráfego transbordado é dada por:

$$m = A.E[A, N1] \quad (4.1.10.)$$

$$v = m.[1 - m + A/(N1 + 1 + m - A)] \quad (4.1.11.)$$

Conhecendo-se m e v é possível calcular os valores de $N1$ e A , para o que se exige métodos numéricos. Alternativamente pode-se utilizar a seguinte relação aproximada [RAPP 32-33]:

$$A = v + 3.(v/m).[(v/m) - 1] \quad (4.1.12.)$$

$$N1 = A.[m + (v/m)] / [m + (v/m) - 1] - (m + 1) \quad (4.1.13.)$$

A probabilidade de bloqueio na rota F é a probabilidade de não haver circuitos disponíveis na rota final dado que não há circuitos disponíveis na rota de primeira escolha:

$$B_F = A.E(A, N1 + NF)/m \quad (4.1.14.)$$

Wilkinson verificou que o tráfego transbordado possui aproximadamente uma distribuição binomial negativa do número de chamadas oferecidas. Mais recentemente Kuczura propôs modelar o

tráfego transbordado como um tráfego poissoniano interrompido [KUCZURA 20-21].

Wilkinson generalizou estas relações para rotas alternativas que recebem o transbordo de vários tráfegos distintos conforme mostra a figura 4.1.4.

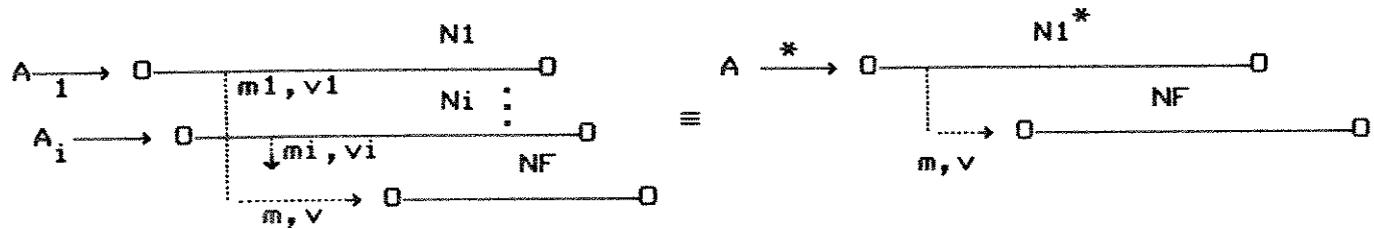


Figura 4.1.4. Caso de uma rota alternativa que recebe transbordo de tráfegos distintos. O diagrama à direita mostra o arranjo equivalente de Wilkinson.

O tráfego total oferecido de transbordo é a soma de todos os tráfegos transbordados das rotas 1 a i. Este tráfego também possui uma distribuição aproximada de uma binomial negativa. Se os tráfegos oferecidos \$A_k\$ forem todos não correlacionados entre si, valem as equações:

$$m = \sum_i m_i \quad e \quad v = \sum_i v_i \quad (4.1.15.)$$

Neste caso existe um tráfego fictício poissoniano \$A^*\$, que oferecido a uma rota fictícia com um número de circuitos \$N_1^*\$, produz um tráfego de transbordo de média \$m\$ e variância \$v\$, com distribuição semelhante à da soma dos tráfegos transbordados. A partir de \$m\$ e \$v\$ calcula-se \$A^*\$ e \$N_1^*\$. A probabilidade de bloqueio na rota \$F\$ para o tráfego fictício e aproximadamente para o somatório de tráfegos é dado por:

$$B_F = A^* \cdot E[A^*, N_1^* + N_F] / m \quad (4.1.16.)$$

Este modelo aborda o problema do ponto de vista de bloqueio em

rotas. O modelo permite o cálculo das probabilidades totais de bloqueio nas rotas. A probabilidade de bloqueio para cada tráfego não é obtida. O modelo de Wilkinson apresenta dificuldades no tratamento de encaminhamento não convencional como transbordo mútuo, rotas bi-direcionais, etc. Este modelo foi criado para tratar redes de encaminhamento hierárquico, que é a abordagem clássica utilizada para cálculo de entroncamentos.

4.1.5. Modelo de Erlang Invertido.

O modelo de Erlang invertido [LE GALL 24] apresenta, a exemplo de Wilkinson, uma formulação com auxílio de um tráfego fictício. Este é um modelo que utiliza apenas um momento. Sua idéia central é criar um tráfego poissoniano fictício que, oferecido a uma rota ou a um conjunto de rotas, produz um tráfego cursado idêntico ao criado pelas fontes de tráfego reais.

A figura 4.1.5. apresenta uma aplicação do modelo para um conjunto de i rotas de primeira escolha que transbordam para uma rota final. Para as rotas de primeira escolha é válida a fórmula de Erlang. Para encontrar o tráfego na rota final são criados os tráfegos fictícios Y_{jf} , que oferecidos a um conjunto de $NF+N_j$ circuitos produz um tráfego cursado $x_F + x_j$. O bloqueio encontrado pelo tráfego fictício Y_{jf} é aproximadamente o mesmo encontrado pelo tráfego A_i .

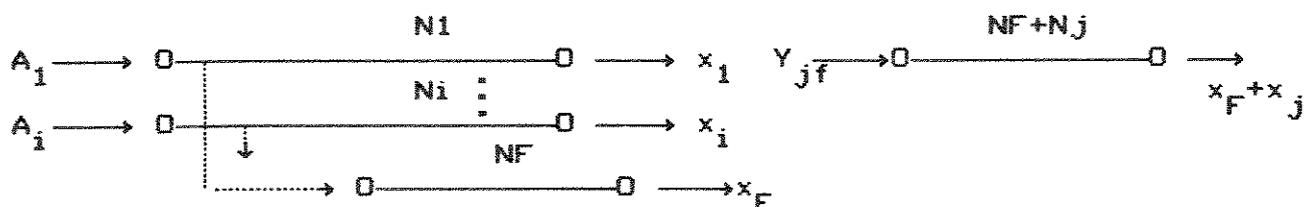


Figura 4.1.5. Tráfego fictício do modelo de Erlang invertido.

O modelo estabelece as seguintes equações:

$$x_j = A_j \cdot [1 - E(A_j, N_j)] \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (4.1.17)$$

$$x_F = \sum_{j=1}^i A_j \cdot \{E[A_j, N_j] - B_{jF}\} \quad (4.1.18.)$$

$$x_F + x_j = Y_{jF} \cdot [1 - E(Y_{jF}, N_j + N_F)] \quad (4.1.19.)$$

Onde:

x_k = tráfego cursado na rota k ,

A_j = tráfego poissoniano oferecido à rota j ,

N_j = número de circuitos na rota j ,

Y_{jF} = Tráfego poissoniano fictício.

$B_{jF} \cong E[Y_{jF}, N_j + N_F]$ = Probabilidade de bloqueio do tráfego j considerando o transbordo para a rota F .

O modelo de Erlang invertido permite abordar o problema de bloqueio tanto do ponto de vista ponto-a-ponto como de bloqueio nas rotas. O modelo se adapta prontamente ao método de resolução por relaxação.

4.1.6. Encadeamento do Tráfego.

Uma vez obtido um modelo para as células de uma rede telefônica é preciso relacionar as células entre si [LEE 23]. Este relacionamento é feito por meio do tráfego compartilhado pelas células. Este encadeamento das células comporta duas abordagens:

Encadeamento por tráfego oferecido e

Encadeamento por tráfego escoado.

Na primeira abordagem não há conservação do tráfego escoado. Neste caso o tráfego escoado que entra num determinado nó de comutação pode ser diferente do tráfego escoado de saída. O tráfego oferecido a uma dada rota de saída é igual à soma dos tráfegos escoados de entrada que são encaminhados para a rota [HENNET 17], [CAMOIN 08].

Esta abordagem é freqüentemente utilizada em conjunto com o método de Wilkinson. Para exemplificar, seja o caso elementar da figura 4.1.6.



Figura 4.1.6. Caso elementar de encadeamento.

A figura 4.1.6. apresenta duas rotas interligadas em série com o mesmo número de circuitos (N). O tráfego poissoniano A é oferecido à primeira rota. Os tráfegos x_1 e x_2 são os tráfegos escoados na primeira e segunda rotas respectivamente.

O modelo de Markov para este caso resulta nas equações:

$$x = x_1 = x_2 \quad (4.1.20.)$$

$$x_1 = A \cdot [1 - E(A, N)] \quad (4.1.21.)$$

O método de encadeamento por tráfego oferecido estabelece as seguintes equações:

$$x_1 = A \cdot Q_1 = A \cdot [1 - E(A, N)] \quad (4.1.22.)$$

$$x = x_2 = x_1 \cdot Q_2 = x_1 \cdot [1 - E(x_1, N)] \quad (4.1.23.)$$

Onde Q_i é a probabilidade de não bloqueio na rota i .

O método de encadeamento por tráfego escoado, por sua vez, estabelece que o tráfego escoado da primeira rota deve ser igual ao tráfego escoado da segunda rota. Este método é o utilizado pelo modelo

de Erlang invertido [LE GALL 24]. As equações para o caso elementar da figura 4.1.6. nesta abordagem são:

$$x = x_1 = x_2 = A \cdot Q_1 \cdot Q_2 \quad (4.1.24.)$$

$$x = Y_1 \cdot Q_1 = Y_1 \cdot [1 - E(Y_1, N)] \quad (4.1.25.)$$

$$x = Y_2 \cdot Q_2 = Y_2 \cdot [1 - E(Y_2, N)] \quad (4.1.26.)$$

Onde Q_i é a probabilidade de não bloqueio na rota i e Y_i é o tráfego poissoniano fictício que oferecido à rota i produz o tráfego escoado x_i . Portanto:

$$Y = Y_1 = Y_2 = A \cdot [1 - E(Y, N)] \quad (4.1.27.)$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = 1 - E(Y, N) \quad (4.1.28.)$$

$$x = A \cdot Q^2 = A \cdot [1 - E(Y, N)]^2 \quad (4.1.29.)$$

Os dois métodos supõem que as probabilidades de bloqueio das rotas encadeadas são independentes.

Os gráficos das figuras 4.1.7. e 4.1.8 apresentam, para cada um dos casos analisados, os valores calculados do tráfego cursado x e da probabilidade de bloqueio total P_b definida como:

$$P_b = (A - x_2) / A \quad (4.1.30.)$$

4.2. - Modelos Analíticos para Redes.

Foi desenvolvido um aplicativo computacional (ANATRAF) em linguagem C, para o cálculo de bloqueio nas redes telefônicas que permite a escolha entre dois modelos alternativos. O primeiro utiliza o modelo de Erlang Invertido (EI) [LE GALL 24] [BONATTI 07] e o segundo é uma simplificação do primeiro. O segundo modelo foi denominado de Erlang Simplificado (ES). Neles se supõem independência estatística de todos tráfegos cursados em todas as rotas de um dado caminho.

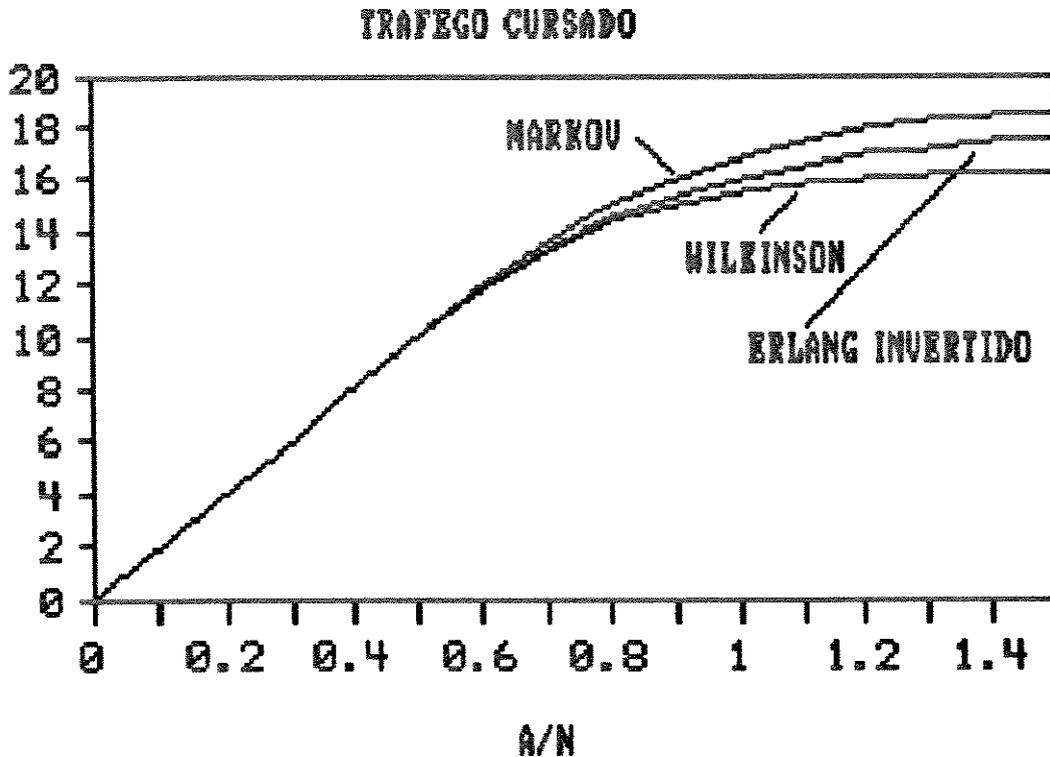


Figura 4.1.7. Tráfego cursado para um arranjo de duas rotas em série com 20 circuitos cada e um tráfego oferecido poissoniano A.

PROBABILIDADE DE BLOQUEIO PONTO A PONTO

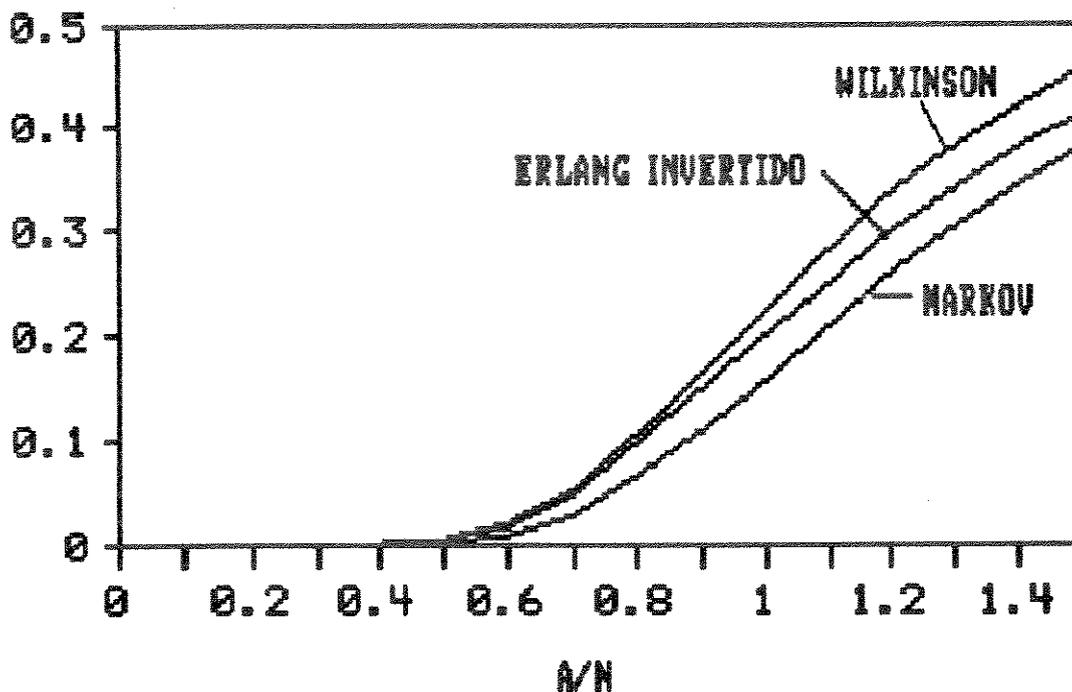


Figura 4.1.8. Probabilidade de bloqueio para um arranjo de duas rotas em série com 20 circuitos cada e tráfego oferecido A.

Para a realização do aplicativo computacional estendeu-se o modelo EI para permitir o estudo de redes com estruturas tão complexas quanto às consideradas no modelo de simulação a eventos discretos.

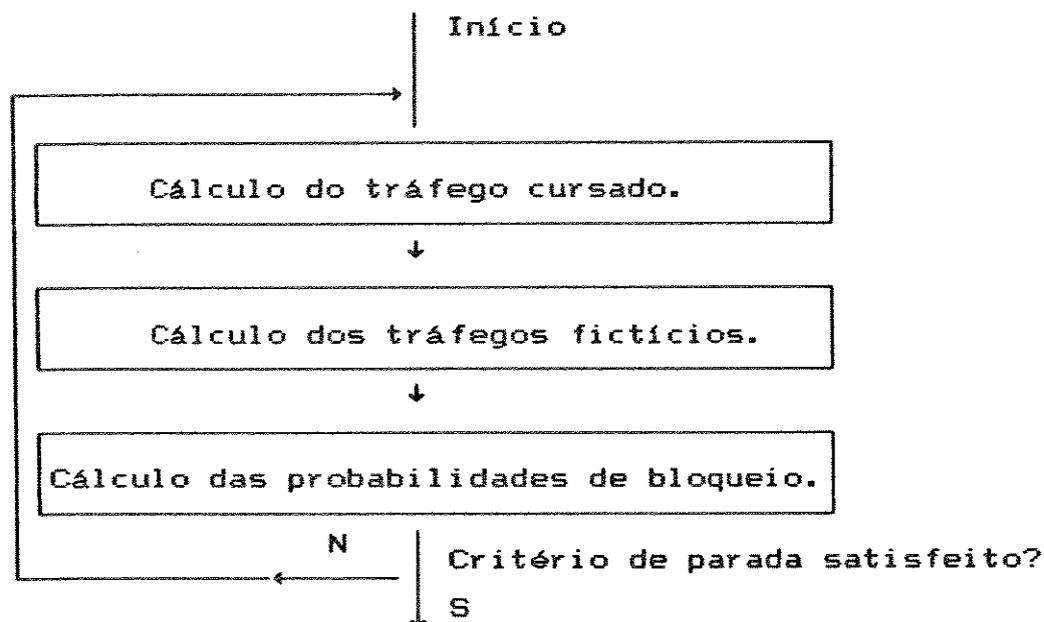


Figura 4.2.1. Diagrama em blocos do algoritmo para o cálculo analítico do bloqueio.

A figura 4.2.1. apresenta um diagrama em blocos do algoritmo utilizado para resolução das equações algébricas não lineares dos modelos EI e ES. Cada iteração do algoritmo é constituída de três etapas: Cálculo do tráfego cursado, cálculo do tráfego fictício e cálculo das probabilidades de bloqueio.

No caso do modelo EI as três etapas são descritas a seguir:

A primeira etapa é o cálculo do tráfego cursado em cada rota. Isto é feito tomando-se o tráfego oferecido relativo a cada código de cada fonte de tráfego e percorrendo todas as trajetórias possíveis (caminhos) de acordo com o plano de encaminhamento adotado para a rede sob estudo.

Em cada nó, isto é, em cada central de comutação, nas rotas de

primeira escolha utilizam-se as probabilidades de bloqueio destas rotas

Nas rotas de transbordo são utilizadas as probabilidades de bloqueio conjuntas das rotas envolvidas. Em cada combinação de transbordo há uma probabilidade associada definida como a probabilidade de bloqueio de um tráfego poissoniano oferecido ao conjunto das duas rotas alternativas.

Para cada novo nó de comutação encontrado no caminho percorrido o tráfego é considerado poissoniano, mesmo sendo resultado de bloqueios e transbordos em rotas anteriores ao nó em questão. Para determinar-se o tráfego cursado multiplica-se o tráfego oferecido do caminho pelas probabilidades de não bloqueio adequadas.

Utiliza-se a abordagem de encadeamento por tráfego cursado. Isto significa que o cálculo do tráfego cursado numa dada rota considera o bloqueio nesta rota e nas rotas anteriores e posteriores de todos os caminhos de tráfego que contém esta rota. O tráfego cursado total da rota é obtido somando-se os tráfegos de todos os códigos e fontes que se utilizam desta rota.

Este processo de cálculo do tráfego cursado implementa com grande flexibilidade qualquer tipo de encaminhamento na rede. Neste aspecto, os modelos de simulação a eventos discretos e de cálculo analítico são igualmente flexíveis. Ambos permitem o estudo de redes com aspectos não convencionais como rotas bidirecionais, transbordo mútuo de tráfego entre rotas e encaminhamento não hierárquico.

A segunda etapa do algoritmo consiste no cálculo dos tráfegos fictícios. O tráfego fictício é definido como sendo o tráfego poissoniano que oferecido a uma rota ou a um conjunto de rotas resultaria num tráfego cursado de média igual à do tráfego cursado

calculado para aquela rota ou conjunto de rotas [BONATTI 07].

Para cada rota de primeira escolha e para cada combinação de transbordo existente é preciso calcular os seus tráfegos fictícios.

Por exemplo, para uma rota de primeira escolha com duas rotas alternativas, deve ser calculado o tráfego fictício da primeira rota, o tráfego fictício conjunto para a primeira e primeira rota alternativa e o tráfego fictício conjunto das três rotas.

É possível que para dois ou mais tráfegos oferecidos distintos haja sequências de transbordos que envolvam as mesmas rotas em ordem diferente. Neste caso é calculado apenas um tráfego fictício para as diferentes sequências que constituem a mesma combinação de rotas.

É devido a esta etapa que o método recebe o nome de Método de Erlang Invertido. Entretanto, no ANATRAF, não é utilizada a inversa da fórmula de Erlang para o cálculo do tráfego fictício, mas sim a divisão do tráfego cursado na rota pela sua probabilidade de não bloqueio.

A terceira etapa do algoritmo consiste em calcular as probabilidades de bloqueio para cada rota e para cada combinação possível de rotas alternativas. Há uma probabilidade de bloqueio correspondente a cada tráfego fictício. Este bloqueio é calculado usando-se a fórmula de Erlang a partir do tráfego fictício e do número de circuitos da rota ou do conjunto de rotas alternativas.

A figura 4.2.2. apresenta um exemplo de um nó com três rotas de saída, uma de primeira escolha e duas alternativas. Ao nó é oferecido um tráfego poissoniano A_i .

Para o cálculo dos tráfegos cursados (X_1 , X_2 e X_3) e das probabilidades de bloqueio (P_1 , P_2 e P_3) é necessário a resolução do sistema de equações descrito pelas equações (4.2.4.) a (4.2.12.).

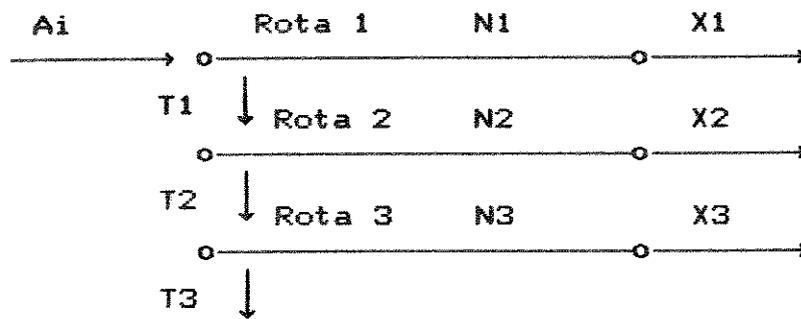


Figura 4.2.2. Conjunto de três rotas com transbordo. Onde A_i é o tráfego oferecido ao nó; X_1 , X_2 e X_3 são os tráfegos cursados em cada rota e N_1 , N_2 e N_3 são suas respectivas capacidades. T_1 é o tráfego transbordado pela rota 1 sobre a 2, T_2 é o da rota 2 sobre a rota 3 e T_3 é o tráfego transbordado para fora da rede, isto é, o tráfego perdido.

As rotas 1, 2 e 3 possuem respectivamente N_1 , N_2 e N_3 circuitos. A rota 1 é a de primeira escolha. O transbordo é feito para a rota 2 e é representado por T_1 . O transbordo da rota 2 é encaminhado para a rota 3 e é representado por T_2 . T_3 é o tráfego total bloqueado no nó. X_1 , X_2 e X_3 representam os tráfegos cursados nas rotas.

As equações de (4.2.1.) a (4.2.3.) definem as probabilidades de bloqueio utilizadas pelo algoritmo. No caso específico estas probabilidades podem ser definidas como as probabilidades do tráfego A_i ser bloqueado pela rota 1 (P_1), pelas rotas 1 e 2 (P_{12}) e pelas rotas 1, 2 e 3 (P_{123}).

$$T_1 = A_i \cdot P_1 \quad (4.2.1.)$$

$$T_2 = A_i \cdot P_{12} \quad (4.2.2.)$$

$$T_3 = A_i \cdot P_{123} \quad (4.2.3.)$$

As equações (4.2.4.) a (4.2.6.) são aquelas utilizadas na

primeira etapa do algoritmo, onde são calculados os tráfego cursados X_1 , X_2 e X_3 .

$$X_1 = A_i - T_1 = A_i \cdot (1 - P_1) \quad (4.2.4.)$$

$$X_2 = T_1 - T_2 = A_i \cdot (P_1 - P_{12}) \quad (4.2.5.)$$

$$X_3 = T_2 - T_3 = A_i \cdot (P_{12} - P_{123}) \quad (4.2.6.)$$

A segunda etapa consiste em obter um tráfego fictício associado a cada probabilidade de bloqueio. No caso específico os tráfegos fictícios são idênticos e igual a A_i . Ou seja, a primeira etapa e a segunda são exatamente inversas. Isto decorre do fato de haver apenas uma fonte de tráfego.

Se forem consideradas mais fontes com encaminhamentos distintos as duas etapas serão independentes e os tráfegos cursados serão aqueles obtidos nas equações de (4.2.4.) a (4.2.6.) somados aos obtidos a partir das demais fontes.

$$Y_1 = X_1 / (1 - P_1) \quad (4.2.7.)$$

$$Y_{12} = (X_1 + X_2) / (1 - P_{12}) \quad (4.2.8.)$$

$$Y_{123} = (X_1 + X_2 + X_3) / (1 - P_{123}) \quad (4.2.9.)$$

A terceira etapa consiste no cálculo das probabilidades de bloqueio, com a aplicação da fórmula de Erlang.

$$P_1 = E(Y_1, N_1) \quad (4.2.10.)$$

$$P_{12} = E(Y_{12}, N_1 + N_2) \quad (4.2.11.)$$

$$P_{123} = E(Y_{123}, N_1 + N_2 + N_3) \quad (4.2.12.)$$

É importante notar que o algoritmo proposto para resolução das

equações de 4.2.4 a 4.2.12 é um algoritmo de relaxação.

Assim, inicialmente supõe-se P_1 , P_{12} e P_{123} nulos nas equações 4.2.4 a 4.2.6. A partir das equações 4.2.7 a 4.2.9 determina-se os tráfegos fictícios Y_1 , Y_{12} e Y_{123} e a partir das equações 4.2.10 a 4.2.12 recalcula-se as probabilidades P_1 , P_{12} e P_{123} , retornando-se as equações 4.2.4 a 4.2.6. A recorrência é interrompida quando ocorre a ϵ convergência nas probabilidades P_1 , P_{12} e P_{123} .

Neste exemplo, em particular, não há aproximações envolvidas e o cálculo é exato em apenas uma iteração.

No caso do modelo Erlang Simplificado (ES) as três etapas são similares às do modelo Erlang Invertido (EI).

A primeira etapa adota a hipótese que todos os tráfegos oferecidos a uma dada rota é sempre poissoniano. Assim, para calcular o tráfego cursado em uma rota de primeira escolha o procedimento é idêntico ao do modelo EI. O cálculo nas rotas de transbordo é feito multiplicando-se o tráfego transbordado pela probabilidade de bloqueio da rota. Esta probabilidade é obtida na terceira etapa do algoritmo. O encadeamento de tráfego e os demais aspectos desta etapa são idênticos aos utilizados pelo modelo EI.

A segunda etapa é constituída pelo cálculo dos tráfegos fictícios em cada rota que são dados pela soma dos tráfegos oferecidos a cada uma. No modelo ES não há tráfegos conjuntos.

A terceira etapa é idêntica à do modelo EI.

As equações de 4.2.13 a 4.2.24 apresentam o modelo ES para o exemplo da figura 4.2.2.

$$T1 = A_i \cdot P_1 \quad (4.2.13.)$$

$$T2 = T1 \cdot P_2 \quad (4.2.14.)$$

$$T3 = T2 \cdot P_3 \quad (4.2.15.)$$

A primeira etapa consiste no cálculo dos tráfegos cursados:

$$X_1 = A_i - T_1 = A_i \cdot (1 - P_1) \quad (4.2.16.)$$

$$X_2 = T_1 - T_2 = T_1 \cdot (1 - P_2) \quad (4.2.17.)$$

$$X_3 = T_2 - T_3 = T_2 \cdot (1 - P_3) \quad (4.2.18.)$$

A segunda etapa consiste na obtenção do tráfego fictício associado a cada probabilidade de bloqueio.

$$Y_1 = X_1 / (1 - P_1) \quad (4.2.19.)$$

$$Y_2 = X_2 / (1 - P_2) \quad (4.2.20.)$$

$$Y_3 = X_3 / (1 - P_3) \quad (4.2.21.)$$

A terceira etapa consiste no cálculo das probabilidades de bloqueio, com a aplicação da fórmula de Erlang.

$$P_1 = \text{Erl}(Y_1, N_1) \quad (4.2.22.)$$

$$P_2 = \text{Erl}(Y_2, N_2) \quad (4.2.23.)$$

$$P_3 = \text{Erl}(Y_3, N_3) \quad (4.2.24.)$$

O critério de parada do algoritmo é dado pelo módulo da maior diferença entre os bloqueios das rotas, que deve ser inferior a um valor pré-fixado ($\text{Max} \{ P_i = E(Y_i, N_i) \} < \epsilon$), obtidos em duas iterações sucessivas. Este critério apresenta um valor contido no intervalo $[0, 1]$, não exigindo nenhum tipo de normalização.

A figura 4.2.3. apresenta um arranjo de duas rotas em série. O sistema de equações para o modelo de Erlang invertido, que neste caso específico é idêntico ao modelo simplificado, é mostrado a seguir:



Figura 4.2.3. Conjunto de duas rotas em série. Onde A_i é o tráfego oferecido ao arranjo, X_1 e X_2 são os tráfegos cursados em cada rota e N_1 e N_2 são suas respectivas capacidades.

$$X_1 = X_2 = A \cdot (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)$$

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= X_1 / (1 - P_1) \\
 Y_2 &= X_2 / (1 - P_2) \\
 P_1 &= \text{Er1}(Y_1, N1) \\
 P_2 &= \text{Er1}(Y_2, N2)
 \end{aligned}
 \tag{4.2.25}$$

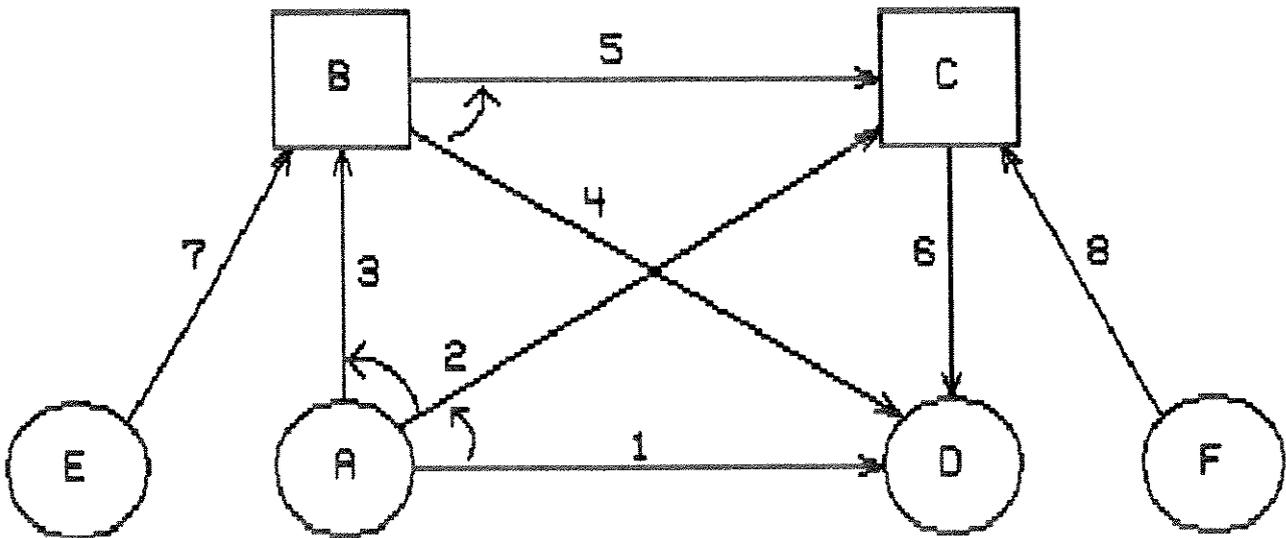


Figura 4.2.4. - Rede quadrangular de dois níveis.

A figura 4.2.4. apresenta um exemplo de uma célula quadrangular de uma rede de dois níveis. Os tráfegos existentes são originados nas centrais A, E e F com destino na central D. A técnica de encaminhamento empregada é a de transbordo. As rotas 1, 2 e 3 são rotas de primeira, segunda e terceira escolha respectivamente para o tráfego originado em A. As rotas 4 e 5 são de primeira e segunda escolha respectivamente para o tráfego encaminhado pela central B. O

sistema de equações obtidos para o modelo de Erlang invertido é o seguinte:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= A_{AD} \cdot (1-P_1) & (4.2.26.) \\
 X_2 &= A_{AD} \cdot (P_1 - P_{12}) \cdot (1-P_6) \\
 X_3 &= A_{AD} \cdot (P_{12} - P_{123}) \cdot \left[(1-P_4) + (P_4 - P_{45}) \cdot (1-P_6) \right] \\
 X_4 &= A_{AD} \cdot (P_{12} - P_{123}) \cdot (1-P_4) + A_{ED} \cdot (1-P_7) \cdot (1-P_4) \\
 X_5 &= \left[A_{AD} \cdot (P_{12} - P_{123}) + A_{ED} \cdot (1-P_7) \right] \cdot (P_4 - P_{45}) \cdot (1-P_6) \\
 X_6 &= X_2 + X_5 + X_8 \\
 X_7 &= A_{ED} \cdot (1-P_7) \cdot \left[(1-P_4) + (P_4 - P_{45}) \cdot (1-P_6) \right] \\
 X_8 &= A_{FD} \cdot (1-P_8) \cdot (1-P_6)
 \end{aligned}$$

$$Y_i = X_i / (1-P_i) \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (4.2.27.)$$

$$Y_{12} = (X_1 + X_2) / (1 - P_{12})$$

$$Y_{123} = (X_1 + X_2 + X_3) / (1 - P_{123})$$

$$Y_{45} = (X_4 + X_5) / (1 - P_{45})$$

$$P_i = E(Y_i, N_i) \quad (4.2.28.)$$

$$P_{12} = E(Y_{12}, N_1 + N_2)$$

$$P_{123} = E(Y_{123}, N_1 + N_2 + N_3)$$

$$P_{45} = E(Y_{45}, N_4 + N_5)$$

4.3. Aspectos Computacionais.

A fórmula B de Erlang, apresentada na equação 4.3.1, permite calcular a probabilidade de bloqueio para um tráfego poissoniano oferecido a um certo número N de circuitos. A expressão apresenta dificuldades numéricas devido a existência de termos fatoriais. A seguir são apresentados dois métodos que superam estas dificuldades.

$$E(A, N) = A^N / \left[N! \cdot \sum_{i=0}^N A^i / i! \right] \quad (4.3.1.)$$

O problema do cálculo direto a partir da fórmula de Erlang deriva da existência de termos fatoriais que crescem rapidamente com o aumento do número de circuitos, inviabilizando seu uso para o cálculo numérico.

Desde o princípio da telefonia é conhecido um método recursivo para o cálculo da fórmula de Erlang, que determina a probabilidade de bloqueio de um dado tráfego oferecido sobre um enlace com N circuitos a partir da correspondente probabilidade para um enlace de N - 1 circuitos [37].

Como para um enlace com 0 circuitos a probabilidade de bloqueio é sempre igual a 1, é possível calcular o bloqueio para 1 circuito e assim sucessivamente até alcançar o número total de circuitos. São necessárias tantas interações quanto o número de circuitos .

$$E(A, N + 1) = A \cdot E(A, N) / [N + 1 + A \cdot E(A, N)] \quad (4.3.2.)$$

Esta relação pode ser obtida a partir da fórmula de Erlang como demonstrado a seguir:

$$E(A, N+1) = \frac{A}{N+1} \cdot A^N / \left[N! \cdot \sum_{i=0}^{N+1} A^i / i! \right]$$

$$E(A, N+1) = \frac{A}{N+1} \cdot A^N / \left[N! \cdot \left[\sum_{i=0}^N A^i / i! + A^{N+1} / (N+1)! \right] \right]$$

$$1/(N+1) \cdot E(A, N+1) = N! \cdot \left[\sum_{i=0}^N A^i / i! + A^{N+1} / (N+1)! \right] / A \cdot A^N$$

$$1/(N+1) \cdot E(A, N+1) = 1/A \cdot E(A, N) + 1/(N+1)$$

$$1/E(A, N+1) = (N+1)/A \cdot E(A, N) + 1$$

$$1/E(A, N+1) = [N + 1 + A.E(A, N)]/A.E(A, N)$$

Portanto tem-se:

$$E(A, N+1) = A.E(A, N)/[N + 1 + A.E(A, N)] \quad (4.3.3.)$$

Mas $E(A, 0) = 1$ para qualquer valor de $A > 0$.

Desta forma é possível calcular a fórmula de Erlang para qualquer tráfego oferecido a um certo número de circuitos, aplicando-se sucessivamente a equação 4.3.3. para $N = 0, 1, 2, \dots$

O método de Dill e Gordon calcula a fórmula de Erlang através de uma recorrência entre as parcelas sucessivas da somatória no denominador da fórmula [KUBASIK 19].

$$E(A, N) = \left[\sum_{i=N}^0 t_i \right]^i \quad (4.3.4.)$$

$$\text{Onde } t_i = \begin{cases} 1 & , \text{ se } i = N \\ t_{i-1} \cdot i / A & , \text{ se } i < N \end{cases}$$

A vantagem deste método reside no fato que, para um dado erro de aproximação, a partir de um certo termo da somatória, as parcelas podem ser desprezadas.

A fórmula de Erlang é fundamentada numa somatória de probabilidades. Cada termo da somatória do denominador corresponde à probabilidade de haver i circuitos ocupados. Existe um estado mais provável cujo número de circuitos ocupados é próximo ao valor do tráfego médio cursado. Acima ou abaixo deste número de circuitos as probabilidades são decrescentes, assim como as parcelas correspondentes da somatória.

Este método reduz a fórmula de Erlang a uma somatória onde os termos podem ser calculados recursivamente, como mostrado a seguir:

$$E(A, N) = \left[\sum_{i=0}^N N! \cdot A^i / A^N \cdot i! \right]^{-1} \quad (4.3.5.)$$

Seja $t_i = N! \cdot A^i / A^N \cdot i!$

Portanto: $t_N = 1$

$$t_{i-1} = t_i \cdot i / A$$

$$E(A, N) = \left[\sum_{i=N}^0 t_i \right]^{-1} \quad (4.3.6.)$$

A expressão 4.3.6. é uma somatória onde cada parcela é calculada a partir da anterior recursivamente.

O programa ANATRAF, quando utiliza o modelo Erlang Invertido, cria uma lista ligada para o armazenamento das probabilidades de bloqueio incondicionais e o tráfego fictício para cada rota e para cada combinação conjunta das rotas. As probabilidades incondicionais são aquelas encontradas a partir da fórmula de Erlang para o tráfego fictício e o número de circuitos correspondentes. Não se deve confundir estas probabilidades com o bloqueio condicional, definido como o número médio de chamadas bem sucedidas dividido pelo número médio de tentativas num dado intervalo de tempo.

A cada iteração do algoritmo, são calculados os tráfegos fictícios e as probabilidades de bloqueio incondicionais a partir de uma varredura de toda a lista ligada. Para cada combinação de rotas é calculada a soma do tráfego cursado e o número de circuitos do conjunto, encontrando o tráfego fictício a partir da probabilidade de bloqueio obtida na iteração anterior e calculado o novo bloqueio utilizando a fórmula de Erlang.

No caso do modelo de Erlang Simplificado é percorrida a lista ligada calculando-se os tráfegos fictícios e as probabilidades de bloqueio de cada rota.

O cálculo do tráfego cursado é feito a partir de uma varredura de todos os códigos de chamadas de todas as fontes de tráfego.

Há uma rotina recursiva que para cada nó da rede calcula o tráfego dirigido para cada rota de saída de acordo com as regras de encaminhamento. Através do nó inicial esta rotina obtém o próximo nó e aciona recursivamente a si mesma até alcançar o nó destino. Desta forma é possível calcular o tráfego cursado numa dada rota considerando-se não apenas a probabilidade de bloqueio na rota, mas também o bloqueio existente nas demais rotas do caminho.

São somados os resultados para cada fonte e para cada código fornecendo o total de tráfego cursado para cada rota. Esta rotina permite também obter as probabilidades de bloqueio condicionais a partir do tráfego oferecido às rotas, o tráfego oferecido à rota seguinte e o tráfego cursado.

4.4. Conclusões.

Os avaliadores de redes telefônicas podem utilizar dois tipos básicos de modelos: O modelo analítico ou o modelo de simulação a eventos discretos.

O modelo analítico é mais eficiente em termos de tempo de execução. Em contrapartida envolve simplificações e aproximações que acarretam imprecisões nos resultados.

O modelo de simulação por sua vez apresenta como resultado um intervalo de confiança e um nível de confiança do resultado. Este intervalo tende a diminuir com o aumento do tempo de simulação. O modelo de simulação, devido à sua estrutura, possui uma grande capacidade de incorporação de novas características sem grande impacto, enquanto que o modelo analítico pode exigir extensas alterações que podem ser muitas vezes inviáveis.

Do ponto de vista prático o modelo de simulação é mais adequado ao estudo de novas técnicas de encaminhamento e à validação de outros modelos, onde o tempo de execução seja um fator não limitante, de forma a permitir a obtenção de resultados precisos.

O modelo analítico é mais adequado ao estudo de redes no planejamento ou gerenciamento de redes telefônicas.

As características do tráfego telefônico e seu modelamento matemático dão origem a três tipos de modelos para as redes telefônicas:

O modelo Markoviano é uma forma exata, mas que torna-se inviável no estudo de redes telefônicas mesmo de pequeno porte.

O modelo equivalente de Wilkinson é um modelo aproximado, mas que permite o estudo de redes de grande porte. Este é um modelo de dois momentos. O tráfego é caracterizado por sua média e variância. O processo de cálculo utiliza o método de encadeamento por tráfego oferecido. Sua principal qualidade é a eficiência dos processos de cálculo. Este é o modelo clássico para o cálculo de bloqueio em redes telefônicas. É um modelo voltado para uma abordagem por rotas. Sua principal deficiência é a dificuldade em modelar certas características recentemente introduzidas em redes telefônicas, tais como rotas bidirecionais e transbordo mútuo de tráfego. O modelo apresenta erros significativos quando as rotas apresentam probabilidades de bloqueio elevadas, devido ao método de encadeamento de tráfego.

O modelo de Erlang Invertido é um modelo aproximado de um momento. Apenas a média do tráfego é considerada. O processo de cálculo utiliza o método de encadeamento por tráfego cursado. O modelo pode ser utilizado tanto na abordagem por rotas como na abordagem ponto a ponto. Sua principal qualidade é permitir modelar qualquer

tipo de encaminhamento. Neste aspecto o modelo de Erlang Invertido apresenta uma potencialidade equivalente ao modelo de simulação a eventos discretos.

O programa ANATRAF foi desenvolvido em linguagem C, o que lhe confere total portabilidade, e foi originalmente concebido para utilização em microcomputadores. É capaz de simular redes de grande porte uma vez que a capacidade de memória exigida é relativamente baixa.

CAPITULO 5. - ANÁLISE DE REDES.

Este capítulo apresenta os resultados de estudos de redes com o auxílio dos aplicativos SIMTRAF e ANATRAF. Estes resultados são comparados aos obtidos com a aplicação dos modelos de Markov e equivalente de Wilkinson. São analisados exemplos elementares de uma, duas e três rotas e redes simples de dois níveis com quatro, cinco e seis centrais. É apresentada uma rede de referência para teste dos programas SIMTRAF e ANATRAF. Como exemplo final é apresentada a análise de uma rede local de médio porte.

5.1. Casos Elementares.

Na figura 5.1.1 são apresentados alguns arranjos elementares usados para validar os modelos analítico e de simulação e para analisar os efeitos das simplificações introduzidas no modelo analítico.

A fim de permitir uma comparação entre as várias topologias, em todas as redes da figura 5.1.1, o tráfego total oferecido a cada uma é igual a 22 Erlangs e há um total de 30 caminhos paralelos (circuitos) entre as centrais origem e destino.

Cada caso foi estudado com os programas SIMTRAF e ANATRAF e, quando possível, foi obtida a solução analítica a partir do modelo markoviano. Foram obtidos, também, os resultados aplicando-se o modelo equivalente de Wilkinson com encadeamento por tráfego oferecido, utilizando-se as aproximações propostas por Rapp [RAPP 32-33].

As simulações a eventos discretos foram feitas em 200 intervalos, cada um com duração de 40 vezes o tempo médio de retenção das chamadas. Os intervalos foram considerados alternadamente em dois

grupos independentes para o cálculo dos intervalos de confiança. Os resultados de probabilidade de bloqueio para o SIMTRAF são apresentados em forma de intervalo de confiança para um nível de confiança de 95%.

Para a análise dos arranjos com o programa ANATRAF utilizou-se o modelo de Erlang invertido.

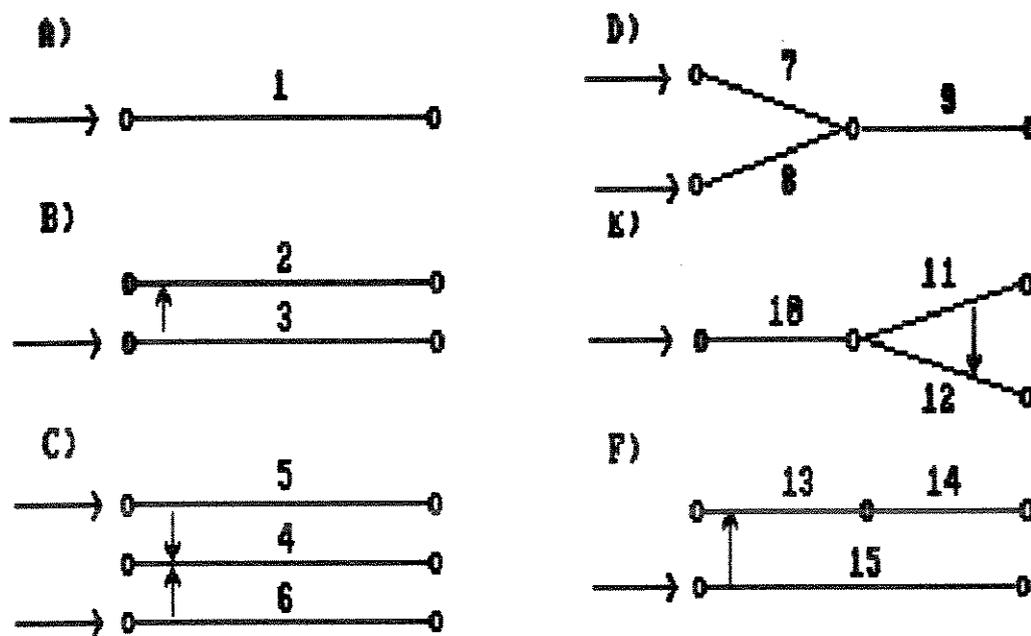


Figura 5.1.1. - Arranjos elementares estudados com as ferramentas SIMTRAF e ANATRAF.

A figura 5.1.1.a. apresenta uma rota simples (rota 1) com 30 circuitos, à qual é oferecida um tráfego de 22 Erlangs. A figura 5.1.1.b. é um arranjo equivalente que apresenta uma rota de primeira escolha (rota 3), com 20 circuitos, e uma rota de transbordo com 10 circuitos (rota 2). Os resultados são apresentados nas tabelas 5.1.1 e 5.1.2 respectivamente.

A probabilidade de bloqueio ponto a ponto nos dois casos é a mesma. Os modelos analíticos apresentam resultados exatos, obtidos a partir da aplicação da fórmula de Erlang. O programa ANATRAF produz este resultado em apenas uma iteração.

MODELO	Pb1 %	Tráfego Cursado
ANATRAF	2.05	21.55
Wilkinson/Rapp	2.05	21.55
SIMTRAF	1.6 - 2.3	21.47
Markov	2.05	21.55

Tabela 5.1.1. Tráfego cursado e bloqueio da rota 1 para o caso (a) da figura 5.1.1.

MODELO	Pb2 %	Pb3 %	Pb Total
ANATRAF	9.8	20.9	2.05
Wilkinson/Rapp	9.8	20.9	2.05
SIMTRAF	8.3-10.2	20.0-21.2	2.00
Markov	9.8	20.9	2.05

MODELO	Tráfego Curs. 2	Tráfego Curs. 3
ANATRAF	4.15	17.40
Wilkinson/Rapp	4.15	17.40
SIMTRAF	4.09	17.40
Markov	4.15	17.40

Tabela 5.1.2. Probabilidades de bloqueio, tráfegos cursados nas rotas 2 e 3 e probabilidade de bloqueio total para o caso (b) da figura 5.1.1.

Na tabela 5.1.1 pode-se observar o efeito das imprecisões sobre a probabilidade de bloqueio e o tráfego cursado. Uma vez que as probabilidades de bloqueio em redes telefônicas em geral são

inferiores a 10%, as imprecisões tem grande impacto percentual sobre o bloqueio e pequeno impacto sobre o tráfego cursado. Neste caso específico, o valor obtido para a probabilidade de bloqueio para o SIMTRAF é de 2.4%, o que representa um erro de 17% em relação ao valor exato que é de 2.05%. O tráfego cursado simulado é de 21.47 Erlangs e apresenta um erro de apenas 0,4% em relação ao valor correto de 21.55 Erlangs.

Na tabela 5.1.2 verifica-se que a probabilidade de bloqueio na rota dois é de 9.8% enquanto que a probabilidade total é de 2.05%. Isto se deve ao fato que à rota dois é oferecido apenas uma parte do tráfego oferecido, correspondente ao transbordo da rota 3. A probabilidade de bloqueio dois é definida como o percentual de tráfego oferecido à rota 2 que é bloqueado. Não se deve confundir esta definição com o bloqueio no tempo, ou seja, o percentual de tempo em que a rota se encontra bloqueada, e que é igual à probabilidade da rota ter todos seus circuitos ocupados num determinado instante. Quando o tráfego oferecido à rota é poissoniano, as duas probabilidades são iguais. O tráfego oferecido à rota 2 é o transbordo da rota 3 e, portanto, não é poissoniano.

A rede da figura 5.1.1.c. possui duas rotas de primeira escolha. A rota 5 possui 15 circuitos e um tráfego oferecido de 16 Erlangs. A rota 6 possui 5 circuitos e um tráfego oferecido de 6 Erlangs. O tráfego bloqueado nestas rotas é transbordado para a rota 4 que conta com 10 circuitos. Para este arranjo, o modelo markoviano possui 1056 estados, evidenciando a dificuldade de se modelar redes, mesmo de pequeno porte, utilizando esta abordagem.

Os modelos de Erlang invertido e equivalente de Wilkinson para este caso são aproximados. Em contrapartida estes modelos permitem cálculos relativamente simples, utilizando somente a média dos

tráfegos ou a média e a variância conforme o modelo. Pode-se observar na tabela 5.1.3 que, neste caso, a diferença entre os dois modelos é muito pequena. As rotas 5 e 6 apresentam resultados exatos enquanto a rota 4 apresenta aproximações.

MODELO	Pb4 %	Pb5 %	Pb6 %	Pb Total
ANATRAF	9.62	21.26	36.04	2.43
Wilkinson/Rapp	9.69	21.26	36.04	2.45
SIMTRAF	9.0-11.0	20.6-22.0	34.1-37.6	2.29

MODELO	Tráfego Curs. 4	Tráfego Curs. 5	Tráfego Curs. 6
ANATRAF	5.028	12.60	3.84
Wilkinson/Rapp	5.024	12.60	3.84
SIMTRAF	5.034	12.60	3.86

Tabela 5.1.3. Bloqueios e tráfegos cursados nas rotas 4, 5 e 6 e probabilidade de bloqueio total para o caso (c) da figura 5.1.1.

A rede da figura 5.1.1.d. possui enlaces em série, os tráfegos cursados nas rotas 7 e 8 convergem para a rota 9. Estas rotas possuem 10, 20 e 30 circuitos, respectivamente e o tráfego oferecido é de 9 Erlangs para a rota 7 e 13 Erlangs para a rota 8.

Sempre que os caminhos que ligam origem e destino possuem dois ou mais segmentos em série, é introduzido algum tipo de imprecisão nos modelos analíticos simplificados. É esta simplificação que torna estes modelos eficientes para o tratamento de redes de médio e grande porte. Em geral esta simplificação é baseada na proposta de Lee [LEE 23] e consiste em considerar os vários segmentos em série independentes. Nos modelos de Erlang invertido e equivalente de Wilkinson esta

simplificação consiste em considerar poissonianos os tráfegos oferecidos às rotas de primeira escolha em cada segmento. Na realidade, exceto no caso do tráfego oferecido ao primeiro segmento, os tráfegos não são poissonianos e quase sempre são subvariantes (média maior que a variância) ou sobrevariantes (média menor que a variância). Esta simplificação leva a uma subestimação do bloqueio para tráfegos sobrevariantes e a uma superestimação para tráfegos subvariantes.

MODELO	Pb7 %	Pb8 %	Pb9 %	Pb Total %
ANATRAF	16.37	1.68	0.99	8.60
Wilkinson/Rapp	16.80	1.80	0.96	8.82
SIMTRAF	15.9-17.4	1.5 - 2.3	0	7.68
Markov	16.80	1.81	0	7.94

MODELO	Tráfego Curs. 7	Tráfego Curs. 8	Tráfego Curs. 9
ANATRAF	7.45	12.66	20.11
Wilkinson/Rapp	7.49	12.76	20.06
SIMTRAF	7.50	12.81	20.31
Markov	7.49	12.76	20.24

Tabela 5.1.4. Bloqueios e tráfegos cursados nas rotas 7, 8 e 9 e probabilidade de bloqueio total para o caso (d) da figura 5.1.1.

No caso do modelo equivalente de Wilkinson adicionalmente ocorre o efeito do encadeamento por tráfego oferecido. Nesta metodologia o cálculo do bloqueio numa dada rota não considera os bloqueios em rotas à frente. Isto tem o efeito de sobreestimar a probabilidade de bloqueio na rota e subestimar o tráfego oferecido à frente.

Na tabela 5.1.4. pode-se observar o efeito do "esquecimento" da subvariância do tráfego oferecido à rota 9. No modelo markoviano exato a probabilidade de bloqueio nesta rota é nula, uma vez que o número de circuitos é igual ao da soma dos circuitos das rotas 7 e 8. Como os modelos analíticos consideram um tráfego poissoniano oferecido à rota 9, obtem-se uma probabilidade de bloqueio não nula para esta rota.

Na rede da figura 5.1.1.e. o tráfego cursado da rota 10 é oferecido à rota 11. O tráfego bloqueado nesta rota é transbordado para a rota 12. As rotas 10, 11 e 12 possuem 30, 10 e 20 circuitos respectivamente.

Na tabela 5.1.5 pode-se observar o efeito do "esquecimento" da subvariância do tráfego oferecido às rotas 11 e 12. A rota 12 não apresenta bloqueio, embora os modelos analíticos obtenham uma probabilidade de 3.1%, devido ao efeito desta simplificação. Neste caso específico a imprecisão é significativa em relação ao valor de 1% para o bloqueio máximo permitido nas rotas finais.

MODELO	Pb10 %	Pb11 %	Pb12 %	Pb Total %
ANATRAF	1.76	56.88	3.10	3.49
Wilkinson/Rapp	2.05	56.77	3.12	3.74
SIMTRAF	1.8-2.3	56.3-57.2	0	2.09

MODELO	Tráfego Curs. 10	Tráfego Curs. 11	Tráfego Curs. 12
ANATRAF	21.23	9.32	11.91
Wilkinson/Rapp	21.55	9.32	11.86
SIMTRAF	21.56	9.34	12.22

Tabela 5.1.5. Bloqueios e tráfegos cursados nas rotas 10, 11 e 12 e probabilidade de bloqueio total do caso (e) da figura 5.1.1.

A rede da figura 5.1.1.f. apresenta dois caminhos alternativos, um composto apenas pela rota 15 e outro por duas rotas em série, as rotas 13 e 14. O tráfego de 22 Erlangs é oferecido inicialmente à rota 15, que transborda para a rota 13. As rotas 13, 14 e 15 possuem 10, 10 e 20 circuitos respectivamente. É uma variante do arranjo da figura 5.1.2.

O tráfego oferecido à rota 14 tem características particulares, pois é o resultado do transbordo da rota 15 para a rota 13. Embora seja um tráfego sobrevariante, ele é limitado pela rota 13. A rota 14 apresenta o efeito do "esquecimento" desta sobrevariância.

MODELO	Pb13 %	Pb14 %	Pb15 %	Pb Total %
ANATRAF	9.72	0.66	20.91	2.16
Wilkinson/Rapp	9.82	0.66	20.91	2.18
SIMTRAF	8.2-10.7	0	20.3-21.7	2.09
Markov	9.82	0	20.91	2.05

MODELO	Tráfego Curs.13	Tráfego Curs.14	Tráfego Curs.15
ANATRAF	4.13	4.13	17.40
Wilkinson/Rapp	4.15	4.12	17.41
SIMTRAF	4.09	4.09	17.41
Markov	4.15	4.15	17.40

Tabela 5.1.6. Bloqueios e tráfegos cursados nas rotas 13, 14 e 15 e probabilidade de bloqueio total do caso (f) da figura 5.1.1.

5.2. Análise de Redes Elementares.

A seguir são apresentados estudos de algumas redes telefônicas simples para validar os programas de simulação a eventos discretos (SIMTRAF) e de modelo analítico (ANATRAF) e permitir uma comparação entre seus desempenhos.

5.2.1. Rede com Encaminhamento tipo Repartição de Carga.

A rede da figura 5.2.1 foi obtida em [BONATTI 12], pp. 57. Ela é constituída por duas centrais de origem, i1 e i2, duas centrais trânsito, k1 e k2, e duas centrais de destino j1 e j2. Entre parênteses são apresentadas as capacidades de cada rota. Sua matriz de tráfego é mostrada na tabela 5.2.1.

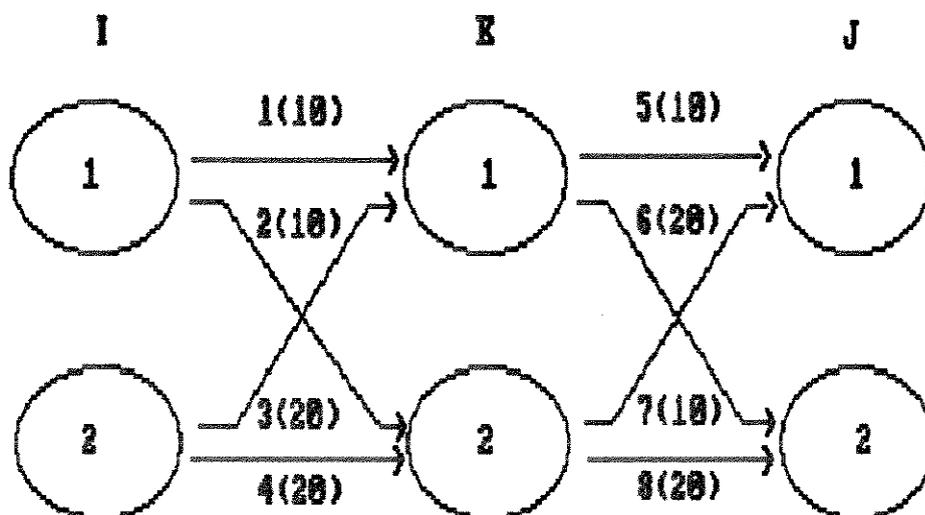


Figura 5.2.1. Rede com encaminhamento por repartição de carga.

Origem	Destino	
	j1	j2
i1	10	20
i2	20	40

Tabela 5.2.1. Matriz de tráfego oferecido (unidades em Erlang).

O encaminhamento é do tipo repartição de carga sem transbordo, onde o tráfego originado é dividido igualmente entre as centrais de trânsito.

Esta rede foi simulada utilizando a linguagem SLAM e os programas SIMTRAF e ANATRAF e os resultados estão mostrados na tabela 5.2.2. para comparação. Tanto no modelo SLAM como no SIMTRAF foram simuladas cerca de 10.000 chamadas cursadas.

ORIG.	DEST.	BONATTI	SLAM	SIMTRAF	ANATRAF
1	1	.53	.540	.523	.526
1	2	.56	.572	.570	.561
2	1	.56	.559	.589	.561
2	2	.60	.613	.623	.599

Tabela 5.2.2. Tráfegos cursados (percentual do tráfego oferecido) para a rede 5.2.1.

A simulação em SLAM foi executada num tempo de 78 minutos, enquanto que a simulação utilizando o SIMTRAF durou cerca de 8 minutos, ambas realizadas em um PCXT sem coprocessador. A velocidade de simulação do SIMTRAF é de 32 eventos tratados por segundo e é pouco influenciada pela topologia da rede. A velocidade do SLAM para esta simulação foi de cerca de 3 eventos por segundo. Porém esta velocidade varia com a complexidade do modelo. O processamento utilizando o programa ANATRAF teve uma duração de 11 segundos.

5.2.2. Redes com Encaminhamento tipo Transbordo.

A seguir são apresentadas redes hierárquicas elementares de dois níveis que utilizam a técnica de encaminhamento por transbordo. Estas redes foram dimensionadas com o auxílio do programa OTELO (TELESP) que é baseado na metodologia apresentada por Rapp [RAPP 32-33]. Esta abordagem utiliza o modelo de Wilkinson com o encadeamento por tráfego oferecido. Foram desenvolvidas cinco tipos de topologias a partir da estrutura clássica de uma rede quadrangular e de uma rede triangular.

5.2.2.1. Rede Quadrangular de dois Níveis Completa.

A rede apresentada na figura 5.2.2. é uma célula quadrangular de uma rede de dois níveis com encaminhamento do tipo transbordo. Deseja-se estudar o tráfego AD. As centrais E e F representam as fontes de tráfego externas à célula formada pelas centrais A, B, C e D. Foi criado um tráfego originado em A e terminado em F para garantir a existência de todas as rotas, que de outra forma não são todas economicamente viáveis. O tráfego AF é oferecido à rota 2 e transborda para a rota 3.

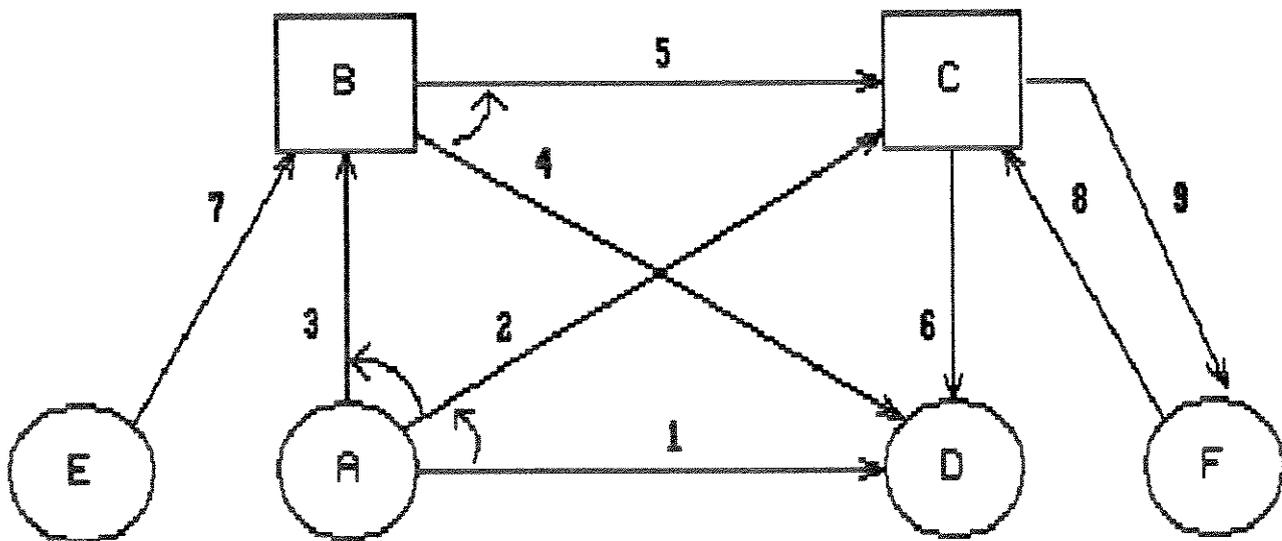


Figura 5.2.2. Rede Quadrangular de dois Níveis Completa.

Foram analisadas duas versões para esta rede. Na primeira versão

(A) o tráfego AD é minoritário e na segunda versão (B) o tráfego AD é majoritário, conforme mostrado na tabela 5.2.4.

ORIGEM	DESTINO	TRÁFEGO VERSÃO A	TRÁFEGO VERSÃO B
A	D	20.0	80.0
A	F	5.0	5.0
E	D	50.0	20.0
F	D	50.0	20.0

Tabela 5.2.4. Matriz de tráfego para a rede quadrangular da figura 5.2.2.

Nos dois casos (versões A e B) as diferenças entre os resultados da simulação a eventos discretos e do modelo analítico decorrem das aproximações do modelo analítico para a soma dos tráfegos não poissonianos e para o tráfego oferecido à rotas de saída de centrais de trânsito.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELO	SIMTRAF	ANATRAF
1	21	12.4-14.6	13.14	13.14	17.4	17.37
2	10	12.4-16.4	15.13	15.93	6.5	6.45
3	11	0 - 1.4	0.89	0.46	1.2	1.14
4	56	4.0-5.1	4.98	4.71	48.0	47.99
5	18	0 - 0.2	0.82	0.37	2.8	2.87
6	71	0.2 - 0.7	0.44	0.46	53.7	53.89
7	66	0.2 - 0.5	0.48	0.49	49.6	49.73
8	66	0.2 - 0.6	0.45	0.49	49.4	49.56
9	12	0 - 0.4	0.34	0.34	4.9	4.98

Tabela 5.2.5. Resultados para a versão A da rede da figura 5.2.2.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELD	SIMTRAF	ANATRAF
1	82	6.6-7.7	6.96	6.96	74.5	74.43
2	14	14.8-20.0	18.71	19.83	8.5	8.57
3	19	0 - 0.5	1.27	0.34	1.9	1.95
4	25	7.5-9.7	7.93	6.69	19.7	20.01
5	12	0.7-2.8	1.01	0.33	2.1	1.85
6	39	0.9-1.9	0.28	0.35	25.6	25.31
7	32	0.1-0.6	0.33	0.34	19.9	19.91
8	32	0.1-0.5	0.33	0.34	20.0	19.88
9	12	0 - 0.4	0.34	0.34	5.0	4.98

Tabela 5.2.6. Resultados para a versão B da rede da figura 5.2.2.

A rota 2 recebe o transbordo da rota 1 e o tráfego poissoniano AF. Assim o tráfego oferecido à rota 2 tem características especiais e nestas condições os modelos analíticos são sempre aproximados.

As rotas 4, 5 e 6 recebem tráfegos transbordados com os seus picos de tráfego ceifados em rotas anteriores. O modelo analítico considera os tráfegos oferecidos às rotas 4 e 6 poissonianos.

Uma terceira simplificação própria do modelo de Wilkinson é devida ao encadeamento de tráfego que não considera os bloqueios à frente.

O fator de ocupação da rota 3 é muito pequeno, aproximadamente igual a 0.1, consequência da grande sobrevariância do seu tráfego oferecido, resultante dos transbordos das rotas 1 e 2.

5.2.2.2. Rede quadrangular de dois Níveis sem Tráfego Entre Centrais Trânsito.

A figura 5.2.3 apresenta uma variante para a rede quadrangular de dois níveis com topologia similar à apresentada na figura 5.2.2 e difere apenas no fato de que não há uma rota interligando as centrais

B e C. As matrizes de tráfego oferecido são as mesmas da rede anterior e estão mostradas na tabela 5.2.4.

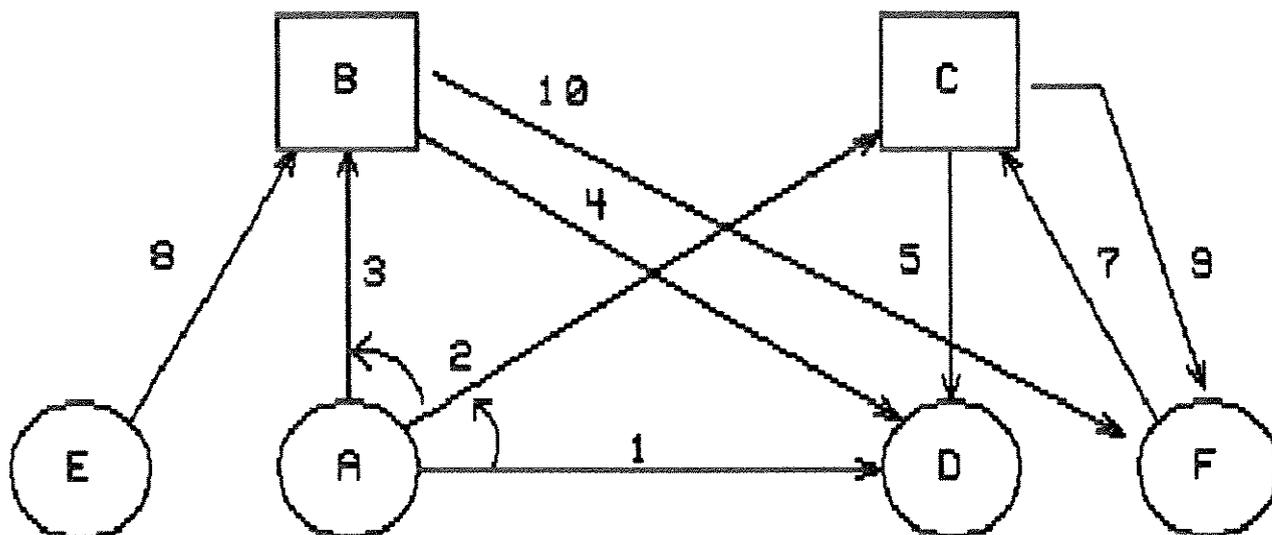


Figura 5.2.3. Rede Quadrangular sem tráfego entre as centrais trânsito.

A versão A evidencia o efeito do modelamento do tráfego da rota 9 como poissoniano. O tráfego cursado na rota 9 e na rota 2 é o mesmo. No entanto a rota 9 conta com 11 circuitos enquanto a rota 2 conta com 10 circuitos. Sendo assim não deve haver bloqueio na rota 9, como comprova a simulação SIMTRAF. O modelo analítico, no entanto, produz um pequeno bloqueio.

As tabelas 5.2.8 e 5.2.9 apresentam alguns resultados para os modelos analíticos não contidos nos intervalos de confiança obtidos pelo SIMTRAF. A rota 3 apresenta imprecisões para os modelos

analíticos devido à soma dos tráfegos AD e AF que possuem encaminhamento distintos. As rotas 4, 5 e 9 apresentam diferenças determinadas pelo "esquecimento" das características não poissonianas dos tráfegos oferecidos.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELQ	SIMTRAF	ANATRAF
1	21	11.7-14.5	13.14	13.14	17.4	17.37
2	10	11.8-15.5	15.10	15.93	6.4	6.45
3	11	0.0-0.6	0.88	0.46	1.1	1.14
4	67	0.1-0.3	0.43	0.38	50.4	50.31
5	69	0.1-0.4	0.35	0.39	51.5	51.46
7	66	0.2-0.5	0.46	0.49	49.5	49.60
8	66	0.3-0.7	0.45	0.49	49.8	49.56
9	11	0	0.50	0.27	4.5	4.59
10	5	0.0-2.5	0.01	0.12	0.5	0.39

Tabela 5.2.8. Resultados para a versão A da rede quadrangular apresentada na figura 5.2.3.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELQ	SIMTRAF	ANATRAF
1	82	6.2-7.6	6.96	6.96	74.3	74.43
2	14	14.4-19.0	18.65	19.83	8.6	8.56
3	19	0.0-0.6	1.27	0.34	1.9	1.94
4	33	0.8-1.7	0.56	0.38	21.1	21.61
5	37	0.4-1.0	0.27	0.40	23.8	23.62
7	32	0.0-0.5	0.33	0.34	19.8	19.88
8	32	0.0-0.4	0.32	0.34	19.6	19.82
9	11	0.1-0.6	0.69	0.20	4.6	4.82
10	5	0.0-0.9	0.00	0.29	0.4	0.15

Tabela 5.2.9. Resultados para a versão B da rede quadrangular apresentada na figura 5.2.3.

5.2.2.3. - Rede Triangular de Dois Níveis.

A figura 5.2.4. apresenta uma rede elementar de dois níveis e apenas uma central de trânsito. Esta topologia permite observar o efeito da soma de tráfegos não poissonianos de intensidades distintas.

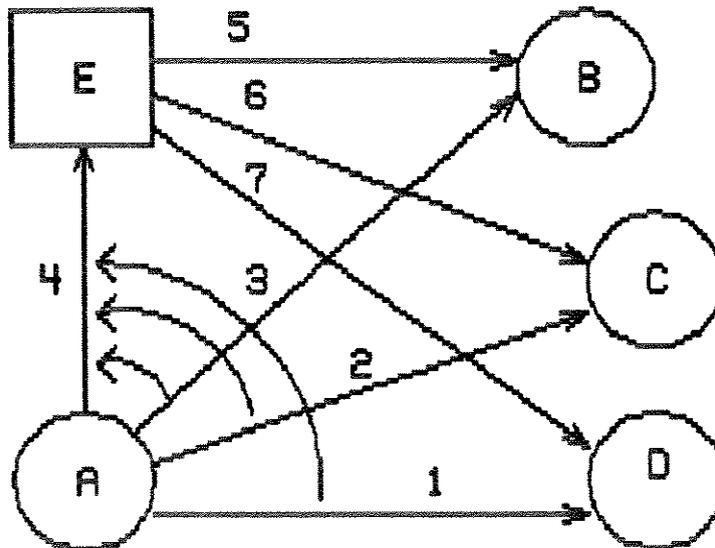


Figura 5.2.4. Rede Elementar Triangular de dois Níveis.

Na versão A, os tráfegos transbordados das rotas diretas 1, 2 e 3 são iguais entre si e os resultados do modelo analítico são mais precisos que no caso da versão B onde estes tráfegos são diferentes.

Nas duas versões os resultados para as rotas 5, 6 e 7 sofrem o efeito do modelamento do tráfego oferecido como poissoniano. Isto se verifica nas tabelas 5.2.11 e 5.2.12 onde o resultado dos modelos analíticos para estas rotas, está muito afastado do intervalo de confiança do modelo de simulação. Os modelos analíticos subestimam a

probabilidade de bloqueio nestas rotas. Como efeito colateral o bloqueio na rota 4 é maior para estes modelos.

ORIGEM	DESTINO	TRÁFEGO VERSÃO A	TRÁFEGO VERSÃO B
A	B	30.0	50.0
A	C	30.0	30.0
A	D	30.0	10.0

Tabela 5.2.10. Matriz de tráfego para a rede da figura 5.2.4.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELD	SIMTRAF	ANATRAF
1	31	9.7-12.0	11.36	11.36	26.6	26.59
2	31	9.9-12.3	11.36	11.36	26.5	26.59
3	31	10.1-12.3	11.36	11.36	26.6	26.59
4	29	0.0-0.1	0.10	0.37	9.2	10.20
5	10	5.6-9.7	0.19	0.19	3.1	3.40
6	10	5.1-9.2	0.19	0.19	3.0	3.40
7	10	4.1-8.0	0.19	0.19	3.0	3.40

Tabela 5.2.11. Resultados para a versão A da rede triangular apresentada na figura 5.2.4.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELD	SIMTRAF	ANATRAF
1	10	18.3-21.9	21.46	21.46	7.8	7.85
2	31	9.5-12.5	11.36	11.36	26.6	26.59
3	51	8.5-9.9	9.32	9.32	45.2	45.34
4	29	0	0.22	0.41	9.0	10.16
5	12	7.2-11.5	0.20	0.20	4.0	4.63
6	10	4.9-8.8	0.19	0.19	3.0	3.40
7	7	2.4-5.4	0.49	0.48	1.9	2.14

Tabela 5.2.12. Resultados para a versão B da rede triangular apresentada na figura 5.2.4.

5.2.2.4. Rede Quadrangular Sem Rotas Direta Entre Trânsito de Origem e Destino.

A figura 5.2.5. apresenta uma rede quadrangular de dois níveis onde não há rotas interligando as centrais E e as centrais B, C e D. Esta topologia é uma variante para a topologia da figura 5.2.4. e a diferença é a existência da rota 8. Isto permite verificar de forma mais destacada o efeito do modelamento do tráfego oferecido à rota 8 como poissoniano. A rota 4 possui 29 circuitos enquanto a rota 8 possui 19 circuitos. Os modelos analíticos, no entanto, apresentam uma pequena probabilidade de bloqueio para a rota 4. As rotas 4, 5, 6 e 7 apresentam as mesmas características versão A da rede da figura 5.2.4.

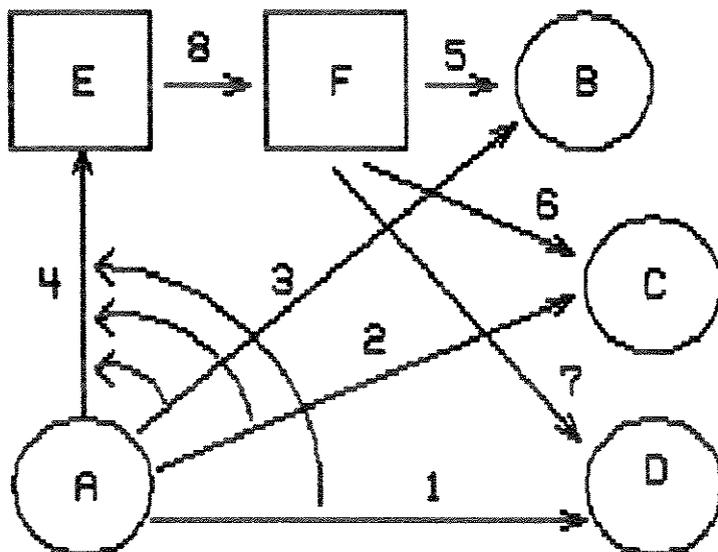


Figura 5.2.5. Rede de dois níveis sem ligação direta via central transitado de origem.

ORIGEM	DESTINO	TRÁFEGO VERSÃO A
A	B	30.0
A	C	30.0
A	D	30.0

Tabela 5.2.13. Matriz de tráfego para a rede da figura 5.2.5.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELO	SIMTRAF	ANATRAF
1	31	10.2-12.1	11.36	11.36	26.6	26.59
2	31	10.2-12.0	11.36	11.36	26.5	26.59
3	31	9.7-12.4	11.36	11.36	26.5	26.59
4	29	0	0.10	0.37	9.0	10.15
5	10	2.6-8.2	0.19	0.18	3.0	3.38
6	10	2.9-6.7	0.19	0.18	2.9	3.38
7	10	3.8-7.2	0.19	0.18	3.0	3.38
8	19	2.4-4.6	0.45	0.44	9.0	10.15

Tabela 5.2.14. Resultados para a rede quadrangular apresentada na figura 5.2.5.

5.2.2.5. Rede Quadrangular Sem Rotas Direta Entre Origem e Destino.

A figura 5.2.6. apresenta uma rede de dois níveis sem rota direta entre as centrais A e D. Esta é uma versão da rede quadrangular completa e todas as observações para aquela rede são válidas para esta. Particularmente no caso das rotas 5 e 6, observa-se, comparando-se os resultados para o SIMTRAF e os modelos analíticos, que o efeito do "esquecimento" da sobrevariância leva a subestimar os bloqueios nestas rotas e sobrestimar os bloqueios nas rotas 2 e 4.

Esta topologia permite analisar os casos de caminhos alternativos

onde o caminho de primeira escolha possui pelo menos duas rotas em série. Este é o caso do tráfego AD que possui um caminho de primeira escolha formado pelas rotas 1 e 7 e dois caminhos alternativos a partir do transbordo sobre a rota 2. As chamadas encaminhadas pelas rotas 1 e que encontram a rota 7 congestionada não são transbordadas para a rota 2. Isto somente seria possível no caso de encaminhamento com "crankback" ou seja com transbordo de retorno à origem. Estas chamadas, no caso de encaminhamento convencional, são eliminadas mesmo se houver circuitos disponíveis nas rotas 2 e 6.

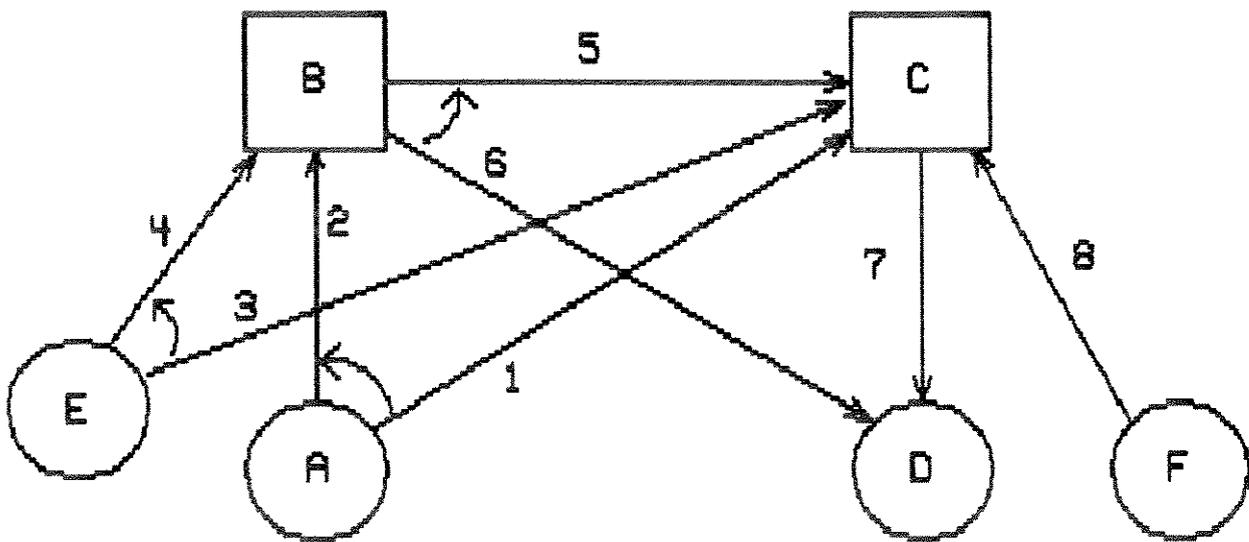


Figura 5.2.6. Rede quadrangular elementar de dois níveis sem rotas diretas entre origem e destino.

ORIGEM	DESTINO	TRÁFEGO VERSÃO A	TRÁFEGO VERSÃO B
A	D	20.0	80.0
E	D	50.0	20.0
F	D	50.0	20.0

Tabela 5.2.15. Matriz de tráfego para a rede da figura 5.2.6.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELD	SIMTRAF	ANATRAF
1	21	11.4-13.7	12.93	13.14	17.3	17.34
2	15	0	0.28	0.29	2.5	2.58
3	56	3.7-5.2	4.41	4.58	47.7	47.58
4	19	0	0.42	0.45	2.0	2.20
5	7	5.6-12.5	0.29	0.34	1.2	0.51
6	7	22.9-29.2	10.68	11.43	3.4	4.27
7	138	0.1-0.4	0.44	0.43	115.9	114.98
8	66	0.2-0.8	0.45	0.49	49.7	49.56

Tabela 5.2.16. Resultados para a versão A da rede apresentada na figura 5.2.6.

ROTA	CIRC.	PROBABILIDADE DE BLOQUEIO %			TRÁFEGO CURSADO	
		SIMTRAF	ANATRAF	OTELD	SIMTRAF	ANATRAF
1	82	6.0-7.4	6.72	6.96	74.5	74.28
2	27	0	0.45	0.49	4.9	5.35
3	24	5.2-6.9	6.45	6.61	18.6	18.62
4	13	0 - 0.3	0.30	0.31	1.2	1.28
5	8	9.5-15.8	0.33	0.42	1.7	0.69
6	9	25.1-31.5	10.41	11.52	4.4	5.94
7	136	0.1-0.2	0.47	0.46	114.5	113.43
8	32	0.1-0.4	0.32	0.34	19.7	19.84

Tabela 5.2.17. Resultados para a versão B da rede apresentada na figura 5.2.6.

Um aumento de bloqueio na rota 7 provoca uma diminuição da ocupação da rota 1. Portanto, parte do tráfego que normalmente transbordaria para a rota 2 não encontra a rota 1 congestionada e é bloqueado mais adiante na rota 7. Esta situação pode ser contornada com a eliminação do bloqueio na rota 7 ou, paradoxalmente com a diminuição de circuitos na rota 1. Neste caso a rede com um menor número de circuitos resulta num maior tráfego escoado.

As versões C e D desta topologia são idênticas à versão A com excessão de uma situação de contingência na rota 7. Foi simulada uma pane de um conjunto de 30 circuitos nesta rota. Na versão D, A rota 1 foi reduzida de 21 para 15 circuitos. Como resultado houve um aumento de 2% no tráfego cursado. Na versão A o fator de ocupação da rota 7 é de 0.8 e nas versões C e D o fator de ocupação passa a 0.95.

VERSÃO	TRÁFEGO CURSADO			TOTAL
	FONTE AD	FONTE AE	FONTE AF	
C	17.6	43.6	43.5	104.8
D	18.0	44.2	44.1	107.0

Tabela 5.2.18. Tráfego cursado para as versões C e D da rede da figura 5.2.6, obtido com o programa ANATRAF.

5.3. Redes complexas.

5.3.1. Rede de Referência.

A rede de referência foi criada para testar a implementação dos algoritmos de simulação. Ela possui um plano de encaminhamento que exercita todas as técnicas implementadas nos programas SIMTRAF e ANATRAF. Assim, para testar o algoritmo após qualquer modificação, basta simular a rede de referência e comparar com os resultados obtidos anteriormente. A figura 5.3.1 apresenta um diagrama da rede que é composta por 8 centrais e 19 rotas.

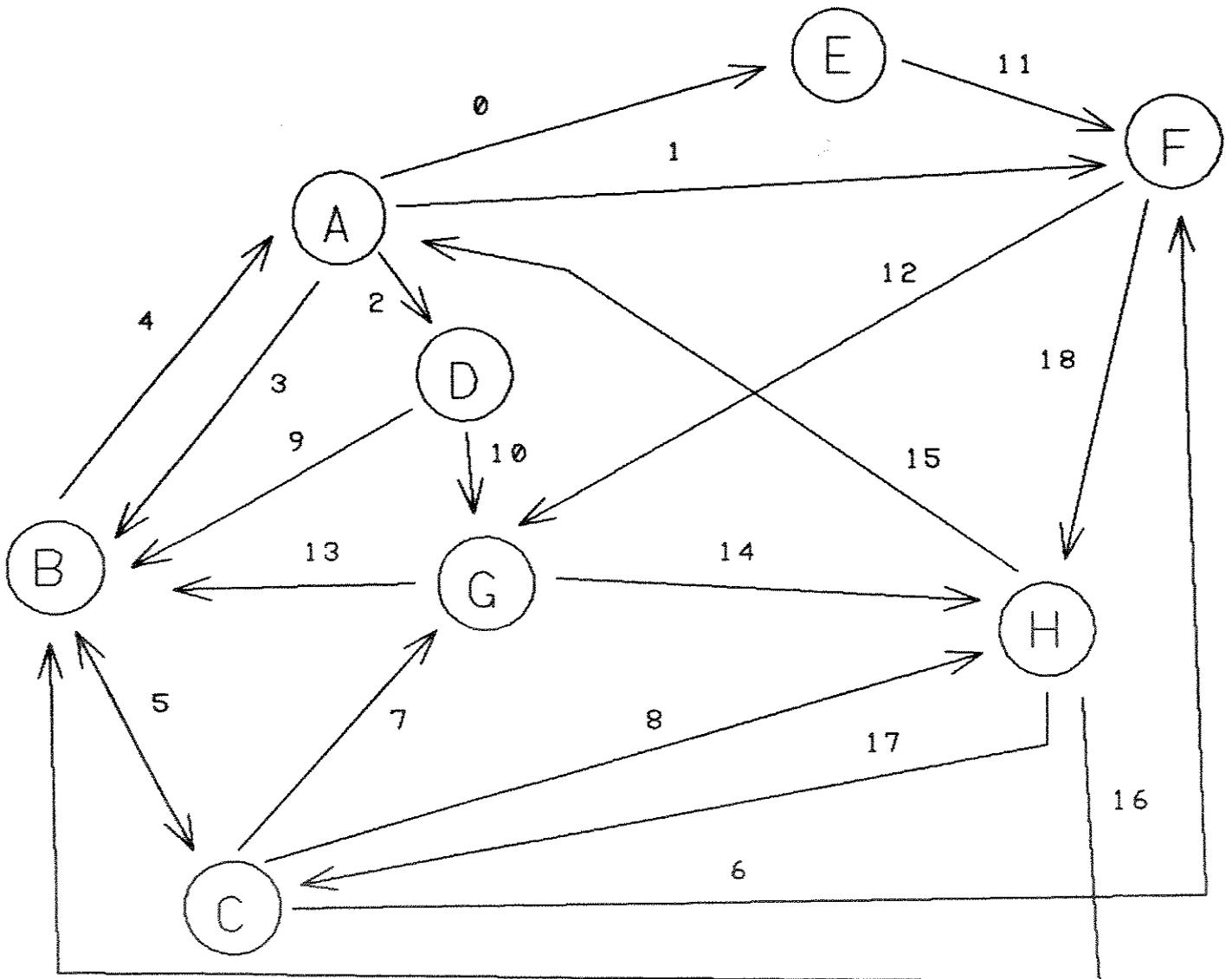


Figura 5.3.1. - Rede de referencia para validacao do algoritmo dos aplicativos SIMTRAF e ANATRAF.

A matriz de tráfego é apresentada na tabela 5.3.1. As centrais A, B e C são as centrais locais. As demais são centrais puramente de trânsito.

ORIGEM	DESTINO	TRÁFEGO (Er1)
A	B	30
A	C	70
B	A	50
B	C	80
C	A	70
C	B	200

Tabela 5.3.1. - Matriz de tráfego para a rede da figura 5.3.1.

A tabela 5.3.2 apresenta o plano de encaminhamento da rede. Para cada central é mostrado o encaminhamento adotado para cada chamada. Este encaminhamento depende do destino das chamadas e da rota de entrada utilizada (ou se a chamada é originada na central). O asterisco indica que a rota de entrada é irrelevante. Nos encaminhamentos do tipo transbordo, as rotas aparecem na ordem de escolha. Nos encaminhamentos do tipo repartição de carga, cada rota está associada a sua probabilidade de escolha.

No caso da central G pode-se observar a utilização de marcação de origem, ou seja, para uma chamada com mesmo destino é possível encaminhar de forma diferenciada conforme a rota de entrada.

A tabela 5.3.3 apresenta uma descrição para os códigos de tipo de encaminhamento utilizados e a tabela 5.3.4 apresenta a quantidade de circuitos disponíveis em cada rota.

No caso de encaminhamento por repartição de cargas com transbordo é possível, quando uma chamada encontrar uma dada rota bloqueada, realizar um transbordo de forma proporcional para as demais rotas,

segundo seus coeficientes de probabilidade. Este procedimento pode ser permitido uma, duas, três vezes ou indefinidamente, até que se verifique que todas rotas estão congestionadas.

CENTRAL	DESTINO	ROTA ENTRADA	TIPO	ROTAS DE SAÍDA
A	B	*	5	0/.25 1/.25 2/.25 3/.25
	C	*	3	0/.30 1/.30 2/.40
B	A	*	1	4
	C	*	1	2
C	A	*	1	8 → 7 → 6
	B	*	1	5 → 8
D	A/B	*	2	9/.30 10/.70
	C	*	1	10
E	A/B/C	*	1	11
F	A	*	1	18
	B/C	*	1	18 → 12
G	A/B	10/12	1	13
	C	10/12	1	14 → 13
	A/B/C	7	1	13
H	A	*	1	15
	B	*	1	16
	C	*	1	17

Tabela 5.3.2. - Plano de encaminhamento para a rede de referência. Esta tabela mostra para cada central o tipo de encaminhamento e as rotas de saída para cada tipo de chamada.

DESCRIÇÃO DO ENCAMINHAMENTO	TIPO
TERMINADA	0
TRANSBORDO	1
REPARTIÇÃO DE CARGA SEM TRANSBORDO	2
REPARTIÇÃO COM TRANSBORDO EXAUSTIVO	3
REPARTIÇÃO COM 1 TRANSBORDO	4
REPARTIÇÃO COM 2 TRANSBORDOS	5
REPARTIÇÃO COM 3 TRANSBORDOS	6

Tabela 5.3.3. - Descrição dos códigos de tipos de encaminhamento.

ROTA	CIRCUITOS	ROTA	CIRCUITOS	ROTA	CIRCUITOS
0	30	6	10	12	25
1	28	7	12	13	30
2	32	8	89	14	30
3	15	9	6	15	56
4	54	10	30	16	47
5	210	11	30	17	65
				18	43

Tabela 5.3.4. - Capacidade das rotas da rede de referência.

TRÁFEGO	TRÁFEGO SIMTRAF	CURSADO ANATRAF	PROBABIL. SIMTRAF	BLOQUEIO ANATRAF
AB	27.84	24.27	6.8%	19.1%
AC	62.08	60.38	11.4%	13.8%
BA	42.62	41.18	14.7%	17.6%
BC	58.11	58.26	27.3%	27.2%
CA	59.25	60.37	15.4%	13.8%
CB	199.83	181.28	10.7%	9.4%

Tabela 5.3.4. - Resultados ponto a ponto obtidos para a rede de referência utilizando os avaliadores SIMTRAF e ANATRAF.

5.3.2. Rede de Médio Porte.

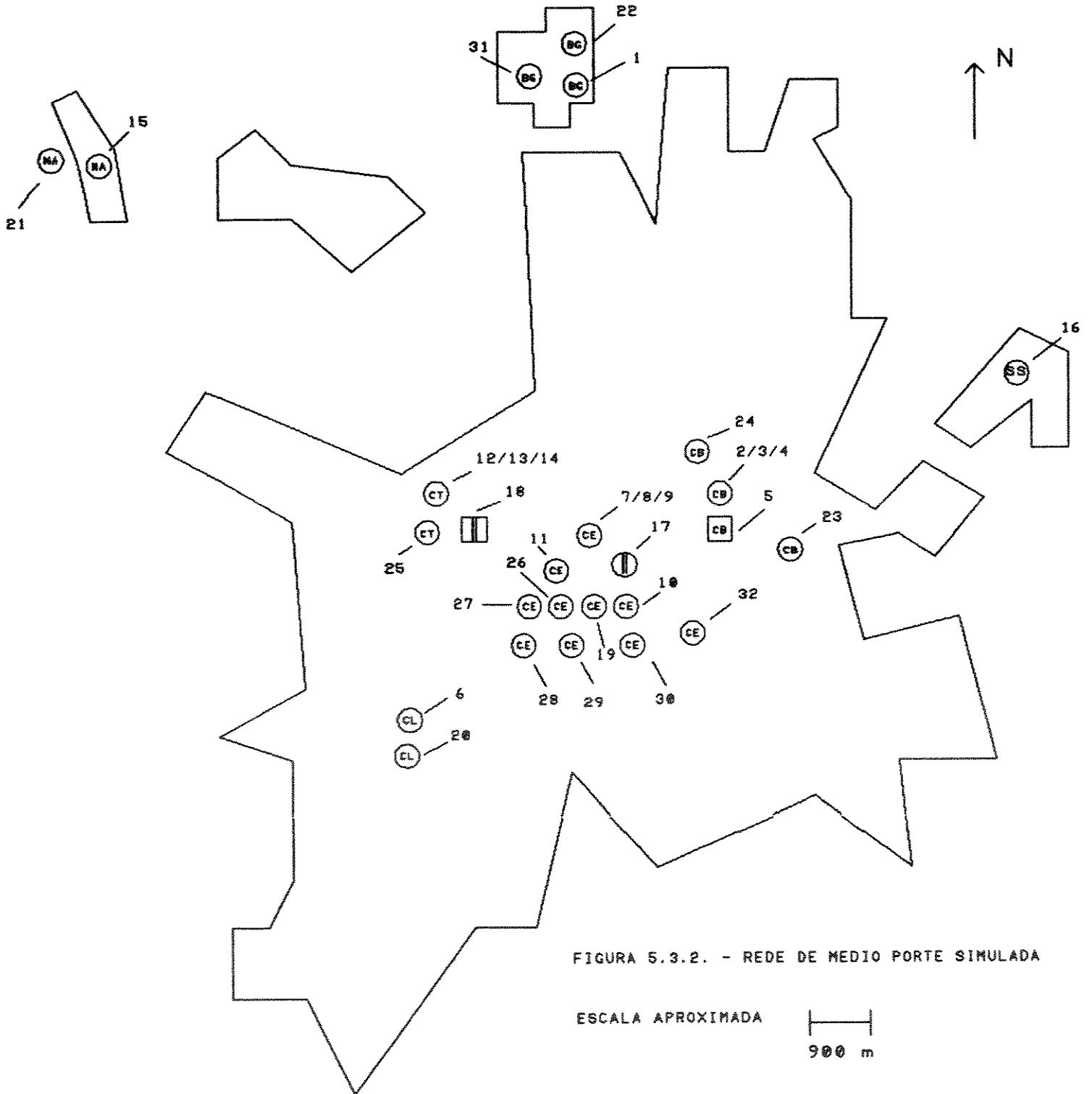
Como teste final dos programas SIMTRAF e ANATRAF foi analisada uma rede local de médio porte baseada na rede local de Campinas com um tráfego oferecido total de 9820 Erlang.

A figura 5.3.2. apresenta um diagrama da área metropolitana de Campinas e a localização aproximada das centrais. As centrais estão localizadas em sete prédios, identificados pelas siglas CE (Centro), CT (Castelo), CL (Campos Elíseos), CB (Cambuí), BG (Barão Geraldo) e NA (Nova aparecida). A rede consiste de 34 nós de comutação dos quais 8 são centrais privadas com discagem direta a ramal (16, 19, 21, 23, 24, 25, 26), 2 nós são fictícios e representam o tráfego interurbano regional, o tráfego interurbano nacional e o internacional (33, 34), 2 são centrais de trânsito interurbanas (17, 18), um nó é uma central centralizadora de serviços (29) e os vinte e um nós restantes são centrais locais ou locais/tandem. Alguns destes nós são, na verdade, estágios de centrais, que o projetista separou em nós distintos para permitir o dimensionamento das rotas internas e externas.

O encaminhamento utiliza apenas rotas de primeira escolha, não havendo transbordo. A maior rota possui 1533 circuitos.

A simulação a eventos discretos SIMTRAF foi realizada em uma estação de trabalho SUN-4. O tempo total simulado foi de 6.7 horas divididos em 400 intervalos, utilizando-se um tempo médio de retenção de 240 segundos. O tempo total de processamento foi da ordem de 12 minutos com velocidade de cerca de 5000 eventos por segundo.

A análise feita com o programa ANATRAF foi feita em um micro-computador PCXT, utilizando-se o modelo de Erlang Invertido. O tempo de execução foi da ordem de 11 minutos para um critério de parada de 0.001.



A diferença média ponderada entre os resultados das simulações com o SIMTRAF e o ANATRAF, obtida entre o tráfego cursado nas rotas foi de 1% do tráfego cursado. A maior diferença percentual foi de 0.11 Erlang para um tráfego de cerca de 1 Erlang. A maior diferença para uma rota com tráfego cursado significativo foi de 1.1 Erlang para um tráfego de cerca de 17 Erlang.

A seguir são apresentados os resultados ponto a ponto para a rede de médio porte obtidas pelo ANATRAF. As fontes de tráfego são numeradas de acordo com as centrais de origem e os códigos correspondem às centrais de destino.

FONTE: 1				FONTE: 11			
COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO	COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
4	29.15	25.62	12.12%	1	7.89	5.78	26.69%
5	11.28	11.25	0.29%	4	56.89	41.47	27.11%
6	10.63	10.56	0.64%	5	21.98	16.09	26.80%
9	31.90	31.65	0.79%	6	27.30	19.90	27.10%
10	8.74	7.37	15.68%	9	100.85	73.13	27.49%
11	9.16	7.81	14.74%	10	27.71	27.48	0.84%
14	29.69	29.42	0.91%	14	62.41	45.39	27.27%
15	3.65	3.64	0.39%	15	8.33	5.91	29.08%
16	3.02	3.00	0.69%	16	2.66	1.94	27.10%
19	3.31	3.30	0.29%	19	2.33	1.65	29.00%
20	1.83	1.79	2.18%	20	2.94	2.09	28.96%
21	0.58	0.57	1.26%	21	0.41	0.29	29.69%
22	2.10	2.09	0.71%	22	1.48	1.04	29.51%
23	0.48	0.42	12.45%	23	0.34	0.25	27.38%
24	0.25	0.25	0.91%	24	0.17	0.12	27.26%
25	0.83	0.82	1.38%	25	0.58	0.42	27.62%
26	10.96	10.93	0.29%	26	20.05	14.52	27.59%
33	54.63	53.79	1.54%	33	82.32	59.05	28.27%
34	22.65	22.22	1.89%	34	39.04	28.04	28.17%

FONTE: 2				FONTE: 12			
COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO	COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	15.16	14.61	3.63%	1	16.40	16.36	0.26%
4	130.23	130.10	0.10%	4	94.51	94.34	0.18%
5	50.34	48.89	2.88%	5	36.50	36.33	0.46%
6	31.36	31.16	0.63%	6	48.19	48.18	0.03%
9	132.44	132.31	0.10%	9	153.04	152.95	0.06%
10	36.39	36.18	0.59%	10	42.07	42.06	0.04%
11	38.15	37.93	0.59%	11	44.11	44.10	0.03%
14	85.89	85.70	0.22%	14	272.88	272.15	0.27%
15	13.46	12.99	3.49%	15	30.81	30.67	0.44%
16	4.00	3.87	3.27%	16	4.19	4.15	0.86%

19	3.50	3.47	0.78%	19	4.14	4.13	0.34%
20	5.41	5.27	2.66%	20	6.36	6.22	2.23%
21	0.61	0.58	4.32%	21	0.72	0.71	1.31%
22	2.22	2.19	1.49%	22	2.63	2.60	1.05%
23	0.51	0.51	0.46%	23	0.62	0.62	0.55%
24	0.25	0.24	3.50%	24	0.30	0.30	1.08%
25	0.87	0.86	0.70%	25	1.03	1.02	0.75%
26	35.09	34.82	0.78%	26	43.97	43.82	0.34%
33	180.17	177.20	1.65%	33	172.39	169.54	1.65%
34	71.51	70.43	1.51%	34	85.23	83.94	1.51%

FONTE: 3

COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	11.100	10.635	4.188%
4	95.220	95.219	0.001%
5	36.790	35.523	3.443%
6	23.040	22.876	0.713%
9	96.820	96.649	0.177%
10	26.610	26.407	0.764%
11	27.900	27.645	0.912%
14	62.800	62.622	0.283%
15	9.850	9.452	4.042%
16	2.930	2.818	3.831%
19	2.570	2.549	0.824%
20	3.340	3.250	2.705%
21	0.440	0.419	4.875%
22	1.630	1.605	1.536%
23	0.390	0.389	0.367%
24	0.190	0.182	4.050%
25	0.640	0.635	0.761%
26	23.680	23.485	0.824%
33	95.400	93.649	1.836%
34	46.340	45.555	1.694%

FONTE: 13

COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	8.790	8.748	0.480%
4	50.700	50.507	0.380%
5	19.590	19.464	0.644%
6	25.820	25.617	0.788%
9	82.100	81.929	0.209%
10	22.580	22.386	0.860%
11	23.670	23.631	0.167%
14	146.090	145.987	0.070%
15	16.530	16.412	0.716%
16	2.250	2.227	1.044%
19	1.240	1.232	0.612%
20	3.300	3.218	2.496%
21	0.380	0.374	1.577%
22	1.400	1.381	1.325%
23	0.330	0.328	0.745%
24	0.160	0.158	1.269%
25	0.550	0.547	0.550%
26	23.490	23.346	0.612%
33	92.870	91.179	1.820%
34	45.790	45.021	1.679%

FONTE: 5

COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	10.140	10.062	0.771%
4	87.100	76.760	11.871%
6	21.090	20.919	0.810%
9	88.590	87.787	0.907%
10	24.340	24.141	0.818%
11	25.520	25.269	0.984%
14	57.440	56.967	0.824%
15	8.990	8.934	0.620%
16	2.680	2.669	0.402%
19	2.280	2.248	1.421%
20	3.090	2.988	3.290%
21	0.400	0.394	1.483%
22	1.430	1.400	2.129%
23	0.340	0.299	12.194%
24	0.170	0.169	0.629%
25	0.570	0.563	1.300%
26	21.570	21.264	1.421%
33	86.570	85.744	0.955%
34	42.370	41.814	1.313%

FONTE: 15

COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	3.170	3.120	1.579%
4	23.200	20.399	12.074%
5	8.960	8.939	0.230%
6	11.280	11.110	1.507%
9	28.550	28.312	0.833%
10	7.820	6.531	16.479%
11	8.190	6.916	15.553%
14	48.340	47.885	0.941%
16	2.070	2.057	0.631%
19	0.880	0.869	1.235%
20	1.820	1.763	3.108%
21	0.150	0.149	0.868%
22	0.560	0.549	1.945%
23	0.130	0.114	12.396%
24	0.070	0.069	0.857%
25	0.220	0.217	1.416%
26	12.790	12.632	1.235%
33	46.820	46.086	1.568%
34	25.020	24.538	1.925%

FONTE: 6

FONTE: 16

TRÁFEGO				TRÁFEGO			
COD	OFER.	CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO	COD	OFER.	CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	10.070	9.994	0.755%	1	3.350	3.311	1.170%
4	58.120	57.569	0.948%	4	8.530	7.487	12.225%
5	22.470	22.281	0.840%	5	3.300	3.287	0.402%
9	107.410	106.390	0.949%	6	5.680	5.611	1.209%
10	29.510	29.255	0.863%	9	11.980	11.824	1.305%
11	30.920	30.687	0.754%	10	3.310	3.270	1.217%
14	76.560	75.799	0.994%	11	3.460	3.412	1.382%
15	11.270	11.068	1.792%	14	8.310	8.208	1.222%
16	4.990	4.928	1.238%	15	2.620	2.593	1.020%
19	3.660	3.598	1.689%	19	0.520	0.511	1.817%
20	3.880	3.742	3.553%	20	0.620	0.597	3.679%
21	0.630	0.613	2.644%	21	0.080	0.078	1.879%
22	2.330	2.274	2.395%	22	0.320	0.312	2.522%
23	0.550	0.543	1.311%	23	0.070	0.061	12.547%
24	0.260	0.256	1.463%	24	0.030	0.030	1.028%
25	0.910	0.897	1.469%	25	0.120	0.118	1.696%
26	26.330	25.885	1.689%	26	3.840	3.770	1.817%
33	109.880	107.553	2.118%	33	12.010	11.848	1.352%
34	51.690	50.668	1.976%	34	7.210	7.087	1.710%

FONTE: 7

FONTE: 7			
COD	OFER.	CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	18.350	18.314	0.195%
4	132.630	132.526	0.078%
5	51.250	50.859	0.762%
6	63.390	63.213	0.279%
9	235.040	235.008	0.014%
10	64.610	64.607	0.005%
11	67.730	67.728	0.003%
14	145.510	145.422	0.060%
15	19.440	19.419	0.108%
16	6.210	6.138	1.161%
19	5.560	5.560	0.003%
20	7.430	7.289	1.899%
21	0.970	0.961	0.975%
22	3.530	3.505	0.722%
23	0.830	0.826	0.444%
24	0.400	0.394	1.386%
25	1.390	1.382	0.540%
26	53.530	53.528	0.003%
33	297.580	292.994	1.541%
34	114.070	112.474	1.399%

FONTE: 26

FONTE: 26			
COD	OFER.	CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	1.150	1.135	1.297%
4	5.880	5.812	1.150%
5	2.370	2.337	1.386%
6	2.420	2.386	1.389%
9	11.010	10.905	0.955%
10	1.780	1.764	0.922%
11	1.730	1.714	0.913%
14	5.850	5.757	1.593%
15	1.440	1.425	1.026%
16	0.690	0.678	1.782%
19	0.650	0.644	0.922%
21	0.110	0.108	1.884%
22	0.410	0.403	1.634%
23	0.090	0.089	1.512%
24	0.050	0.049	2.006%
25	0.150	0.147	2.065%
34	1.090	1.071	1.738%

FONTE: 8

FONTE: 8			
COD	OFER.	CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	8.31	8.27	0.45%
4	59.99	59.81	0.30%
5	23.18	23.06	0.54%
6	28.57	28.42	0.54%
9	106.34	106.23	0.10%
10	29.22	29.20	0.07%
11	30.65	30.63	0.06%
14	65.87	65.38	0.74%
15	8.78	8.77	0.17%
16	2.80	2.77	0.94%

FONTE: 33

FONTE: 33			
COD	OFER.	CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	61.27	58.50	4.52%
4	262.87	251.00	4.52%
5	89.95	89.09	0.96%
6	103.81	99.12	4.51%
9	556.97	531.81	4.52%
10	101.50	96.92	4.51%
11	93.72	89.49	4.51%
14	277.23	264.71	4.52%
15	51.86	49.52	4.52%
16	11.60	11.44	1.35%

19	2.50	2.50	0.07%	19	35.28	33.66	4.60%
20	3.56	3.49	1.96%	21	6.22	5.89	5.35%
21	0.44	0.44	1.04%	22	22.36	21.18	5.28%
22	1.59	1.58	0.79%	23	5.33	5.07	4.87%
23	0.37	0.37	0.66%	24	2.66	2.62	1.58%
24	0.19	0.19	1.16%	25	8.90	8.46	4.97%
25	0.63	0.62	1.22%	34	59.14	58.64	0.85%
26	26.45	26.43	0.07%				
33	180.77	177.79	1.65%				
34	59.47	58.57	1.51%				

FONTE: 10

COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	7.59	5.54	26.99%
4	54.79	39.78	27.40%
5	21.18	15.44	27.10%
6	26.30	19.10	27.39%
9	97.19	70.19	27.78%
11	27.99	27.87	0.45%
14	60.18	43.59	27.56%
15	8.02	5.67	29.37%
16	2.55	1.85	27.39%
19	2.44	1.73	29.29%
20	3.06	2.17	29.25%
21	0.43	0.30	29.98%
22	1.55	1.09	29.80%
23	0.36	0.26	27.67%
24	0.18	0.13	27.56%
25	0.61	0.44	27.91%
26	21.02	15.16	27.88%
33	91.17	65.13	28.56%
34	41.34	29.57	28.46%

FONTE: 34

COD	TRÁFEGO OFER.	TRÁFEGO CURSADO	PROBAB. BLOQUEIO
1	10.00	9.74	2.62%
4	40.00	38.95	2.62%
5	12.56	12.45	0.89%
6	23.30	22.69	2.61%
9	95.50	93.00	2.62%
10	15.47	15.07	2.61%
11	14.16	13.79	2.61%
14	46.19	44.98	2.61%
15	9.67	9.42	2.62%
16	1.78	1.76	1.27%
19	3.75	3.65	2.70%
21	0.66	0.64	3.46%
22	2.39	2.31	3.40%
23	0.56	0.54	2.97%
24	0.28	0.28	1.51%
25	0.94	0.91	3.08%

5.4. Conclusões.

O modelo de Erlang Invertido é um modelo aproximado de um momento. Apenas a média do tráfego é considerada. O processo de cálculo utiliza o método de encadeamento por tráfego cursado. O modelo pode ser utilizado tanto na abordagem por rotas como na abordagem ponto a ponto. Sua principal qualidade é permitir modelar qualquer tipo de encaminhamento. Neste aspecto o modelo de Erlang Invertido apresenta uma potencialidade equivalente ao modelo de simulação a eventos discretos. Em relação ao modelo de Wilkinson, o modelo de Erlang Invertido apresenta uma menor eficiência no processo de cálculo. Em contrapartida apresenta grande flexibilidade quanto ao

encaminhamento e em geral uma melhor precisão.

Foram apresentados neste capítulo os resultados da aplicação dos programas SIMTRAF e ANATRAF em vários exemplos de redes telefônicas. Os exemplos elementares validaram as implementações do algoritmo de simulação a eventos discretos (programa SIMTRAF) e do modelo analítico (programa ANATRAF). Uma rede denominada rede de referência, contendo todas as possibilidades do plano de encaminhamento, foi elaborada e permitiu uma análise exaustiva dos programas implementados. A aplicação dos programas em uma rede de porte similar à da rede de Campinas mostrou a adequação das ferramentas computacionais para o estudo de problemas reais.

Em alguns destes exemplos os resultados foram comparados com aqueles obtidos com um programa comercial de simulação (SLAM). O programa SIMTRAF mostrou-se aproximadamente 10 vezes mais rápido que o SLAM, além de produzir uma estimativa dos intervalos de confiança das probabilidades de bloqueio enquanto que no SLAM só se obtém os valores médios e variâncias dos resultados.

O programa ANATRAF é aproximadamente 150 vezes mais rápido que o programa SIMTRAF. Assim, para redes de porte médio como a de Campinas (aproximadamente 100.000 terminais e 10.000 Erlang de tráfego), pode-se considerar apropriado o estudo em um microcomputador PC-XT utilizando-se o programa ANATRAF ou em uma estação de trabalho usando-se ou programa SIMTRAF ou o ANATRAF.

Através do estudo de alguns casos particulares, foi numericamente ressaltada as limitações do modelo analítico, impostas pelas suas aproximações simplificadoras. O "esquecimento" do caráter sobrevariante do tráfego nas rotas à frente é o fator de maior relevância nos desvios numéricos do modelo analítico quando comparado com a simulação a eventos discretos.

As aproximações envolvidas no modelo de Erlang Invertido são desprezíveis se forem válidas as seguintes condições:

- As probabilidades de bloqueio são pequenas ($< 10\%$).
- Os tráfegos oferecidos tem variância próxima à média ($V/A < 1.5$).

A primeira condição é garantida pelas normas de dimensionamento e encaminhamento usualmente aplicadas ao planejamento de redes.

A segunda condição geralmente é cumprida pelo critério de otimização de custos no planejamento de redes. Frequentemente nas redes telefônicas, os tráfegos de transbordo, sobrevariantes e altamente distorcidos, somam-se a tráfegos aproximadamente poissonianos, pois é comum que rotas finais, para um determinado tráfego, sejam rotas de primeira escolha para uma outra parcela de tráfego; desta forma o tráfego poissoniano dilui o tráfego sobrevariante.

As rotas que possuem um tráfego fortemente sobrevariante (variância muito maior que a média) são pouco econômicas, pois a relação entre o tráfego escoado e o número de circuitos é muito baixa. O fator de ocupação dos circuitos é pequeno, quando a probabilidades de bloqueio é menor que 10%, conforme ilustrado pela rota 2 da figura 5.1.1.b. que possui 10 circuitos e um tráfego oferecido de cerca de 3 Erlangs. Sua probabilidade de bloqueio é 5% e seu fator de ocupação é de cerca de 30%. Para efeito de comparação, uma rota com 10 circuitos suporta um tráfego poissoniano de 3 Erlangs com probabilidade de bloqueio de apenas 0.1% ou de 6 Erlangs para um bloqueio de 5%.

Rotas com tráfego oferecido sobrevariante permanecem com baixa ocupação durante certos períodos de tempo e com surtos de alta ocupação, quando há grande probabilidade de congestionamento. Em redes que possuam uma hora de maior movimento bem destacada, estas rotas permanecem sub-utilizadas durante a maior parte do dia. Portanto do

ponto de vista de otimização de custos, rotas com tráfegos fortemente sobrevariantes são caras.

É interessante observar que a soma de vários tráfegos sobrevariantes não resulta em um tráfego mais favorável. Como mostra Wilkinson, a soma de tráfegos não correlacionados resulta num tráfego com média e variância iguais à soma das médias e variâncias dos tráfegos.

A obtenção de modelos analíticos precisos e eficientes computacionalmente é fundamental no desenvolvimento dos avaliadores de desempenho e nas ferramentas de planejamento.

CAPÍTULO 6. - CONCLUSÕES.

O capítulo 2 apresentou a necessidade do uso de ferramentas de síntese e análise para o planejamento de redes telefônicas. Em geral as ferramentas de síntese são menos precisas e mais eficientes em termos de tempo de execução. As ferramentas de análise são mais precisas e podem ser menos eficientes computacionalmente.

As ferramentas de análise devem permitir:

- A validação do processo de planejamento, na avaliação dos resultados da fase de síntese em condições nominais ou em condições de contingência.
- O estudo de novas técnicas de encaminhamento.
- O estudo de redes telefônicas já implantadas com o objetivo de otimizar seu desempenho ao longo do tempo, de acordo com as variações de tráfego e disponibilidade de recursos.

Os avaliadores de redes telefônicas podem utilizar dois tipos básicos de modelos: O modelo analítico ou o modelo de simulação a eventos discretos.

O modelo analítico é mais eficiente em termos de tempo de execução. Em contrapartida envolve simplificações e aproximações que levam a uma imprecisão nos resultados, que são menores que às apresentadas pelas ferramentas de síntese.

O modelo de simulação por sua vez apresenta como resultado um intervalo de confiança e um nível de confiança do resultado. Este intervalo tende a diminuir com o aumento do tempo de simulação. Assim o modelo de simulação pode ser tão preciso quanto se queira. Esta precisão, no entanto, exige um grande custo em tempo de processamento.

O modelo de simulação, devido à sua estrutura, possui uma grande capacidade de incorporação de novas características sem grande impacto, enquanto que o modelo analítico pode exigir grandes alterações. Do ponto de vista prático o modelo de simulação é mais adequado a estudos de novas técnicas de encaminhamento e validação de outros modelos, onde o tempo de execução seja um fator não limitante, de forma a permitir a obtenção de resultados precisos. O modelo analítico é mais adequado ao planejamento ou gerenciamento de redes telefônicas.

O simulador de eventos discretos SIMTRAF, especializado em redes telefônicas foi apresentado no capítulo 3. A duração das chamadas e o tempo entre chegadas foram modelados como variáveis aleatórias de distribuição exponencial. Isto permitiu uma representação agregada das chamadas em conversação, reduzindo a necessidade de memória quando comparada com a simulação a eventos discretos convencional. O programa SIMTRAF constitui-se em uma ferramenta computacional acabada para a simulação a eventos discretos de redes telefônicas. Sua principal característica é tratar variadas estruturas topológicas (hierárquicas ou não) e de encaminhamento (transbordo, repartição de carga, etc.).

Para efeito de comparação foi apresentada a linguagem SLAM para simulação de sistemas e desenvolvido um modelo para redes telefônicas baseada nesta linguagem.

O programa SIMTRAF foi desenvolvido em linguagem C, o que lhe confere grande portabilidade, e originalmente concebido para utilização em microcomputadores. Mesmo redes de médio porte podem ser simuladas neste ambiente embora o tempo de execução seja um fator limitante. Esta limitação foi sensivelmente reduzida através de sua instalação em estações de trabalho.

Um dos aspectos importantes do SIMTRAF é o seu calendário que

possui uma estrutura não convencional, baseada nas propriedades ergódicas do tráfego telefônico. As chamadas são agrupadas em conjuntos que reduzem a exigência de memória e tornam o processo de pesquisa no calendário mais eficiente.

O programa SIMTRAF utiliza o método de simulação em intervalos. A cada intervalo são obtidas amostras da probabilidade de bloqueio nas rotas. A partir destas amostras é obtido o intervalo de confiança dos resultados para um nível de confiança de 95% e estimado a correlação entre intervalos. Esta abordagem exige do usuário a especificação do número de intervalos e do seu tempo de duração para que os seguintes requisitos sejam satisfeitos:

O número de intervalos deve permitir uma convergência dos estimadores de variância e correlação. Verificou-se experimentalmente que o número de intervalos deve ser superior a 30 e tipicamente igual a 50.

O tempo de duração dos intervalos deve garantir que a correlação entre intervalos seja desprezível e que para cada rota ocorra em cada intervalo pelo menos de 5 a 10 chamadas bloqueadas. Verificou-se que a duração de um intervalo deve ser superior a 10 vezes o tempo de retenção das chamadas.

O capítulo 4 apresentou a ferramenta analítica para avaliação de bloqueio em redes telefônica ANATRAF.

As características do tráfego telefônico e seu modelamento matemático deram origem a diversos métodos de modelamento analítico. O capítulo 4 apresenta três destes tipos de modelos para as redes telefônicas:

O modelo Markoviano é uma forma exata mas que torna-se inviável no estudo de redes telefônicas mesmo de pequeno porte.

O modelo equivalente de Wilkinson é um modelo aproximado, mas que permite o estudo de redes de grande porte. Este é um modelo de dois momentos. O tráfego é caracterizado por sua média e variância. O processo de cálculo utiliza o método de encadeamento por tráfego oferecido. Sua principal qualidade é a eficiência dos processos de cálculo. Este é o modelo clássico para o cálculo de bloqueio em redes telefônicas. É um modelo voltado para uma abordagem por rotas. Sua principal deficiência é a dificuldade em modelar certas características recentemente introduzidas em redes telefônicas, tais como rotas bidirecionais e transbordo mútuo de tráfego. O modelo apresenta erros significativos quando as rotas apresentam probabilidades de bloqueio elevadas, devido ao método de encadeamento de tráfego.

O modelo de Erlang Invertido é um modelo aproximado de um momento. Apenas a média do tráfego é considerada. O processo de cálculo utiliza o método de encadeamento por tráfego cursado. O modelo pode ser utilizado tanto na abordagem por rotas como na abordagem ponto a ponto. Sua principal qualidade é permitir modelar qualquer tipo de encadeamento. Neste aspecto o modelo de Erlang Invertido apresenta uma potencialidade equivalente ao modelo de simulação a eventos discretos.

O programa ANATRAF foi desenvolvido em linguagem C, o que lhe confere total portabilidade, e foi originalmente concebido para utilização em microcomputadores. É capaz de simular redes de grande porte uma vez que a capacidade de memória exigida é compatível com estes equipamentos.

No capítulo 5 foram apresentados os resultados da aplicação dos programas SIMTRAF e ANATRAF em vários exemplos de redes telefônicas. Os exemplos elementares validaram as ferramentas de simulação a

eventos discretos (programa SIMTRAF) e do modelo analítico (programa ANATRAF). Uma rede denominada rede de referência, contendo todas as possibilidades do plano de encaminhamento, foi elaborada e permitiu a análise exaustiva dos programas implementados. A aplicação dos programas numa rede de porte similar ao da rede de Campinas mostrou a adequação das ferramentas computacionais para o estudo de problemas reais.

Em alguns destes exemplos os resultados foram comparados com aqueles obtidos com um programa comercial de simulação (SLAM). O programa SIMTRAF mostrou-se aproximadamente 10 vezes mais rápido que o SLAM, além de produzir uma estimativa dos intervalos de confiança das probabilidades de bloqueio enquanto que no SLAM só se obtém os valores médios e variâncias dos resultados.

Pode ser considerada apropriada a utilização de um microcomputador PCXT usando-se o programa ANATRAF ou em uma estação de trabalho usando-se o programa SIMTRAF, para o estudo de redes de porte médio como a de Campinas (aproximadamente 100.000 terminais e 10.000 Erlangs de tráfego).

Através do estudo de alguns casos particulares foi numericamente ressaltada as limitações do modelo analítico impostas pelas suas aproximações simplificadoras. O "esquecimento" do caráter sobrevariante do tráfego nas rotas à frente é o fator de maior relevância nos desvios numéricos do modelo analítico quando comparado com a simulação a eventos discretos.

Como continuação deste trabalho são apontados os seguintes objetivos:

Melhorar os modelos analítico, permitindo a análise de robustez frente a variações de tráfego e buscando uma maior precisão nos resultados, e o modelo de simulação, permitindo a simulação de

chamadas com distribuição de duração das chamadas não exponencial.

Desenvolver técnicas, utilizando os modelos desenvolvidos, para a otimização do plano de encaminhamento de redes telefônicas em relação ao seu desempenho. Esta otimização pode ser feita com ou sem alteração do entroncamento. No primeiro caso a variável é unicamente o plano de encaminhamento. A otimização busca a melhor seqüência de rotas alternativas no caso de encaminhamento tipo transbordo ou os coeficientes de distribuição de tráfego no caso de encaminhamento tipo repartição de carga. No segundo, caso além da otimização do encaminhamento, é permitida a alteração da disponibilidade de circuitos nas rotas lógicas. Esta modificação nas rotas é limitada pela rede física disponível.

A otimização do plano de encaminhamento encontra aplicações na pós-otimização da rede na fase de planejamento e no auxílio ao gerenciamento da rede. Com este tipo de ferramenta é possível, durante a fase de operação, ajustar o plano de encaminhamento à evolução da rede de forma otimizada.

Como evolução da otimização do plano de encaminhamento em relação ao desempenho, tem-se a otimização do encaminhamento em relação ao custo da rede. Este tipo de otimização é utilizada na fase de planejamento de redes telefônicas.

A obtenção de modelos analíticos precisos e eficientes computacionalmente é fundamental no desenvolvimento dos avaliadores de desempenho e nas ferramentas de planejamento.

CAPÍTULO 7. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - ACKERLEY, R. G. - Overall Grade-of-Service Models for the British Telecom Network. ITC 12, 1.1B.1, Junho 1988.
- [02] - ARCHER, N. P. - Choosing a Language for an MBA System Modeling and Simulation Course. Simuletter, vol 16, No 3, July, 1985.
- [03] - ASH, R. G.; CARDWELL, R. H.; MURRAY R. P. - Design and Optimization of Network with Dynamic Routing. The Bell System Technical Journal, pp. 1787-1820, Oct, 1981.
- [04] - ASH, G. R.; HAFKER, A. K.; KRISHNAM, K. R. - Servicing an Real-Time Control of Networks with Dynamic Routing. The Bell System Technical Journal, pp. 1821-1845, Oct, 1981.
- [05] - BEL, G.; CHEMOUIL, P.; GARCIA, J. M.; LE GALL, F. - Adaptive Traffic Routing in Telephone Networks. Large Scale System Journal, vol 8, No 3, 1985.
- [06] - BINNEY, C.; WANG, W.; PINSKY, E. - Network Design with Ensemble: A Tool for Performance Analysis of Circuit Switched Networks. International Telecommunication Symposium, Sep., 1990, Rio de Janeiro, Brasil.
- [07] - BONATTI, I. S. - Gestion de Réseaux de Service: Application au Réseau Telephonique Interurbain. Tese de Doutorado, Universidade Paul Sabatier de Toulouse, No 767, 1981.

[08] - CAMDIN, B.; MASSON, A. - Étude de la Robustesse des structures de Réseaux - Le modèle MALEPESTE. Nota técnica NT/RCC/RTR/415, CNET, 1978.

[09] - DE PIERI, E. R. - Encaminhamento de Chamadas Telefônicas: Otimização de Parâmetros. Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP, 1987.

[10] - ELLDIN, A. - Switch Calculations General Survey. Telefonaktiebolaget L. M. Ericson, Sweden, 1969.

[11] - FISHMAN, G. S. - Concepts and Methods in Discrete Event Digital Simulation. John Wiley & Sons, 1973

[12] - FISHMAN, G. S. - Principles of Discrete Event Simulation. John Wiley & Sons, New York, 1978.

[13] - FRANÇA, P. M.; FERNANDES, J. F. R.; TAVARES, H. M. F. - Expansão de Redes Telefônicas. SBA: Controle e Automação, Vol 1, No. 3, pp. 207-215, 1987.

[14] - GARCIA, A. S. - Planejamento do Entroncamento em Redes Telefônicas Urbanas em processo de Digitalização. Tese de Doutorado, FEE, UNICAMP, 1987.

[15] - GARCIA, A. S.; BORTOLON, S. - Um Método Heurístico para Otimização do Roteamento Considerando a Modularidade do Sistema de Transmissão. A ser publicado.

[16] - GORDON, G. - System Simulation. Prentice-Hall inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1978.

[17] - HENNET, J. C.- Étude de Politiques d'Achéminement d'Appels dans un Réseau Téléphonique Interurban à Deux Niveaux Hierarchiques. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Toulouse, No 12, 1978.

[18] - KLEINROCK, L.-Queueing Systems. John Wiley & Sons, Vol. 1, 1975.

[19] - KUBASIK, J. - On Some Numerical Methods for the Computation of Erlang and Engset Functions. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 958-963, 1985.

[20] - KUCZURA, A. - The Interrupted Poisson Process as an Overflow Process. The Bell System Technical Journal, vol 52, No 3, pp. 437-448, 1973.

[21] - KUCZURA, A.; BAJAJ, D. - A Method of Moments for the Analysis of a Switched Communication Network Performance. IEEE Transactions on Communications, vol 25, pp. 185-193, 1977.

[22] - LAGE, LUIZ CARLOS MACHADO - Planejamento de Redes de Entroncamento em Áreas Urbanas Multi-Centrais. Tese de mestrado, Departamento de ciência da computação, UFMG, outubro, 1989.

[23] - LEE, C. Y. - Analysis of Switching Networks. The Bell System Technical Journal, No 34, pp. 1287-1315, 1955.

[24] - LE GALL, F.; BERNUSSOU, J. - An Analytical Formulation for Grade of Service Determination in Telephone Networks. IEEE Transactions on Communications, vol COM-31, No 3, March, 1983.

[25] - LE GALL, F. - About Loss Probabilities for General Routing Policies in Circuit-Switched Networks. IEEE Transactions on Communications, vol 37, No 1, pp. 57-59, jan, 1989.

[26] - LIN, P.; ET ALL - Analysis of Circuit-Switched Networks Employing Origination-Office Control with Spill-Forward. IEEE Transactions on Communications, vol 26, No 6, pp. 754-765, 1978.

[27] - MIHRAM, G. A. - Simulation - Statistical Foundations and Methodology. Mathematics in Science and Engineering, Vol 95, Academic Press, 1972.

[28] - MOLINA, E. C. - Application of the Theory of Probability to Telephone Trunking Problems. The Bell System Technical Journal, No 6, pp. 461-494, 1927.

[29] - MORENO, A. O. - Planejamento de redes telefônicas - Determinação do circuito de junção. Tese de mestrado, ITA, Agosto, 1974.

[30] - PEGDEN, C. DENNIS - SLAM : Simulation Language for Alternative Modeling Simulation. Simulation, vol 33, No 5, pp. 145-157, nov, 1979.

[31] - PRITSKER, A.; ALAN, B. - Introduction to Simulation and Slam. Second Edition, Halsted Press, New York, 1984.

[32] - RAPP, Y. - Planning of Junction Network in a Multi-exchange Area - I.General Principles. Ericsson Technics, No 1, 1964.

[33] - RAPP, Y. - Planning of Junction Network in a Multi-exchange Area - II.Extensions of the Principles and Applications. Ericsson Technics, No 1, 1964.

[34] - SALLAY, G.; DELY, Z. - Dimensioning Alternate Routing Networks With Overload Protection. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 189-194, 1985.

[35] - TOZZI, C. L. - Projeto Auxiliado por Computador. Editora da Unicamp, edição 1, 1986.

[36] - WILKINSON, R. I. - Theories for Tool Traffic Engineering in the U.S.A. The Bell System Technical Journal, No 35, pp. 421-514, 1956.

[37] - Teoria do Tráfego Telefônico. Edgard Blucher, Siemens A.G., São Paulo, 1975.

[38] - Encaminhamento de Chamadas Telefônicas Automáticas e Semi-automáticas. Sistema de Práticas Telebrás, Série Engenharia 210-110-700, 01/02/78./78.

BIBLIOGRAFIA

- [01] - ADAM, R. N.; DOGRAMACI, A. - Current Issues in Computer Simulation. Academic Press, 1979.
- [02] - AKIMARU, H.; KAGECHIKA, A.; TAKAHASHI, H. - Mean and Variance of Overflow Traffic for Time Dependent Inputs. IEEE Transactions on Communications, Vol 34, No 3, pp. 238-243, Março, 1986.
- [03] - AKIMARU, H.; TAKAHASHI, H. - An Approximate Formula for estimating individual call losses in overflow systems. IEEE Transactions on Communications, vol 31, pp. 808-811, 1983.
- [04] - AKINPELU, J. M. - The Overload Performance of Engineered Networks With Nonhierarchical and Hierarchical Routing. The Bell System Technical Journal, vol 63 , No 7 , pp. 1261-1281, 1984.
- [05] - BAYBARS, I.; EDAHL, R. H. - A Heuristic Method for Facility Planning in Telecommunication Networks With Multiple Alternate Routes. Naval Research Logistics, Vol. 35, pp. 503-528, 1988.
- [06] - BENES, V. E. - Growth, Complexity and Performance of Telephone Connecting Networks. The Bell System Technical Journal, pp. 499-539, Feb, 1983.
- [07] - BONATTI, M.; ET ALL - Models for an Effective of end-to-end GOS Parameters and for their Repartition in IDN Networks. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 682-688, 1985.

[08] - BROTMAN, L. ; MINKER, J. - Digital Simulation of Complex Traffic Problems in Communication Systems. Operations Research, vol 5, No 5, pp. 670, oct, 1957.

[09] - BHAT, U. N. - Sixty Years of Queuing Theory. Manage Sci., No 15, pp. B280-B292, 1969b.

[10] - BOER, J. de - Blocking of Overflow Traffic Components. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 175-181, 1985.

[11] - CAVALLERO, E.; TONIETTI, A. - An Approximation for Evaluating the Quality of Service of a Telephone Network in Failure Conditions. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 676-681, 1985.

[12] - CHAN, W. S. - Recursive Algorithms for Computing End-to-End Blocking in a Network with Arbitrary Routing Plan. IEEE transactions on Communications, pp. 153-164, Vol 28, Fevereiro, 1980.

[13] - CHEMOUIL, P.; FILIPIAK, J.; GAUTHIER, P. - Analysis and Control of Traffic Routing in Circuit-Switched Networks. North-Holland Computer Networks and ISDN Systems, 11, pp.203-217, 1986.

[14] - CHUNG, F. R.; GRAHAM. R. L.; HWANG, F. K. - Efficient Realizations Techniques for Network Flow Patterns. The Bell System Technical Journal, vol 60, No 8, 1981.

[15] - CLOS, C. - A Study of Non-Blocking Switching Networks. The Bell System Technical Journal, No 32, pp. 406-424, 1953.

[16] - DELBROUCK, L. E. N. - The Uses of Kosten's Systems in the Provisioning of Alternate Trunk Groups Carrying Heterogeneous Traffic. IEEE Transactions on Communications, Vol 31, No 6, pp. 741-749, junho, 1983.

[17] - DELBROUCK, L. E. N. - A Unified Appriximate Evaluation of Congestion Functions for Smooth and Peaky Traffics. IEEE transactions on Communications, pp. 85-91, Vol 29, fevereiro, 1981.

[18] - DESCHAMPS, P. J. - Analytic Approximation of Blocking Probabilities in Circuit Switched Communication Networks. IEEE transactions on Communications, pp. 603-606, Vol 27, março, 1979.

[19] - DZIONG, Z. - Equivalent Path Approach for Circuit Switched Networks Analysis. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 696-702, 1985.

[20] - FILIPIAK, JANUSZ; CHEMOUIL, PROSPER - Modeling and Prediction of Traffic Fluctuations in Telephone Networks. IEEE transactions on communications, vol 35, No 9, pp. 931-941, set, 1987.

[21] - FLETCHER, G. Y.; PERROS, H. G.; STEWART, W. J. - A Queueing Network Model of a Circuit Switching Acess Scheme in an Integrated Services Environment. IEEE Transactions on Communications, Vol 34, No 1, pp. 25-30, Janeiro, 1986.

[22] - FRANKS, R. L.; RISHEL, R. W. - Overload Model of Telephone Operation. The Bell System Technical Journal, vol 53, No 9, pp. 1589-1615, Novembro, 1973.

[23] - FREDERICKS, A. A. - Congestion in Blocking Systems - A Simple Approximation Technique. The Bell System Technical Journal, vol 59, pp. 805-827, 1980.

[24] - GARCIA, J.; ET ALL - Comparative Evaluation of Centralized.Distributed Traffic Routing Policies in Telephone Networks. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 861-866, 1985.

[25] - GIRARD, A. - Blocking Probability of Noninteger Groups with Trunk Reservation. IEEE Transactions on Communications, Vol 33, No 2, pp. 113-120, Fevereiro, 1985.

[26] - HAENSCHKE, D. G.; KETTLER, D. A.; OBERER, E.- Network Management and Congestion in the U.S. Telecommunications Network. IEEE Transactions on Communications, vol 29, No 4, 1981.

[27] - HILLS, M. T. - Telecommunications Switching Principles. First MIT Edition, The MIT Press, Massachusetts, 1982.

[28] - JAGERMAN, D. L. - Methods in Traffic Calculations. The Bell System Technical Journal, Vol. 63, No. 7, pp. 1283-1310, 1984.

[29] - KAJIWARA, M. ET ALL - Future Local Telephone Networks Configurations. IEEE Transactions on Communic. pp. 102-110, 1980.

[30] - KAPPEL, J. G. - Service Standards: Evolution and Needs. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 1097-1103, 1985.

[31] - KERNER, MARTIN; LEMBERG, L.; SIMMONS, DAVID M. - An Analysis of Alternative Architectures for the Interoffice Network. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-4, No. 9. pp. 1404-1413, dezembro 1986.

[32] - KORTANEK, K. O.; LEE, D. N.; POLAK, G. G. - A Linear Programming Model for Design of Communications Networks With Time Varying Probabilistic Demands. Naval Research Logistics Quarterly, No 28, pp. 1-32, 1981.

[33] - LABETOULE, J. - Mixing of Traffic on a Trunk Group: Calculation of Blocking Probabilities Using An Extension of the ERT method. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 945-951, 1985.

[34] - LEBOURGES, M.; BECQUE, C.; SONGHURST, D. - Analysis and Dimensioning of Non-Hierarchical Telephone Networks. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 182-188, 1985.

[35] - LE GALL, F.; BERNUSSOU, J. - Blocking Probabilities for Trunk Reservation Policy. IEEE Transactions on Communications, Vol 35, No 3, pp. 313-318, Março, 1987.

[36] - LE GALL, F.; BERNUSSOU, J., GARCIA, J.- A State Dependent One Moment Model for Grade of Service and Traffic Evaluation in Circuit Switched Networks. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 952-957, 1985.

[37] - MANFIELD, D. R.; DOWNS, T. - Decomposition of Traffic in Loss Systems with Renewal Input. IEEE Transactions on Communications, vol. 27, pp. 44-58, 1979.

[38] - MANFIELD - On the One-Moment Analysis of Telephone Traffic Networks. IEEE transactions on Communications, pp. 1169-1174, Vol 27, Agosto, 1979.

[39] - MATSUMOTO, J.; WATANABE, Y. - Individual Traffic Characteristics of Queuing Systems with Multiple Poisson and Overflow Inputs. IEEE Transactions on Communications, vol. 33, pp. 1-9, 1985.

[40] - MEIER-HELLSTERN, K. S. - The analysis of a Queue Arising in Overflow Models. IEEE Transactions on Communications, vol 37, No 4, pp. 367-372, apr, 1989.

[41] - NEAL, S. R. - Blocking Distributions for Trunk Network Administration. The Bell System Technical Journal, Vol 59, pp. 829-844, Julho, 1980.

[42] - OKAZAKI, H. - Planning Digital Exchange Locations and Boundaries in Urban Area. NEC Research & Development, No.66, pp. 7-15, Jul, 1982.

[43] - PAUL, R. J.; BALMER, D. W. - Simulation Lecture Notes. The London School of Economics and Political Science, 1985.

[44] - PEGDEN, C. DENNIS; GATELY, MICHAEL P. - A Decision-Optimization Module for SLAM. Simulation, vol 34, No 1, pp. 18-25, jan, 1980.

[45] - PILLIOD, J. J. - Fundamental Plans for Toll Telephone Plan. The Bell System Technical Journal, vol 31, No 5, pp. 832-850, 1952.

[46] - ROSENBERG, ERIC - A Nonlinear Programming Heuristic For Computing Optimal Link Capacities in a Multi-Hour Alternate Routing Communications Network. Operations Research, Vol. 35, No. 3, pp. 354-364, maio-junho, 1987.

[47] - RUDIN, H.; MUELLER, H. - Dynamic Routing and Flow Control. IEEE Transactions on Communications, pp. 1030-1039, vol. COM-28, No 7, 1980.

[48] - SHIMIZU, TAMIO - Simulação em Computador Digital. Edgard Blücher, São Paulo, 1975.

[49] - SHINOHARA, MASAOKI - Circuit Dimensioning Algorithm for Optimizing Circuit-Switched Networks. Electronics and Communications in Japan, vol 70-A, No 2, Feb 87, pp261-270.

[50] - SZELAG, C. R. - Trunk Demand Servicing in the Presence of Measurement Uncertainty. The Bell System Technical Journal, Vol 59, No 6, pp. 845-860, Julho-Agosto, 1980.

[51] - TOTH, E. - Computation of Second Derivates of Erlang's B and Wilkinson's Formulae and Its application on Planing of Junction Networks. Teletraffic Issues in Advanced Information Society, ITC 11, North-Holland, pp. 965-971, 1985.

[52] - TRUIT, C. J. - Traffic Engineering Techniques for Determining Trunk Requeriments in Alternate Routing Trunk Networks. The Bell System Technical Journal, No 2, pp. 277, Março, 1954.

[53] - VAN DOORN, E. A. - A Note on Delbrouck's Approximate Solution to the Heterogeneous Blocking Problem. IEEE Transactions on Communications, Vol 32, No 11, pp. 1210-1211, Novembro, 1984.

[54] - WALLSTRÖM, B. - Congestion Studies in Telephone Systems With Overflow Facilities. Ericsson Technics, No 3, 1966.

[55] - WALLSTRÖM, B. - Methods for Optimizing Alternative Routing Networks. Ericsson Technics, No 1, 1969.

[56] - WHITT, W.; SMITH, D. R. - Resource Sharing for Efficiency in Traffic Systems. The Bell System Technical Journal, Vol 60, No 1, pp. 39-55, Janeiro, 1981.

[57] - WINNICKI, A.; PACZYŃSKI, J. - An Approach to Design Three Layer Controlled Telephone Networks. Large Scale Syst.J. Vol 1, No 4, 1980.

[58] - YUM, TAK-KIN G., SCHWARTZ, MISCHA. - Comparison of Routing Procedures for Circuit-Switched Traffic in Nonhierarchical Networks. IEEE Transactions on Communications, vol COM-33, No 5, 1987.

[59] - Especificação de sinalização entre registradores para a rede nacional de telefonia via terrestre. Sistema de práticas TELEBRÁS, Série engenharia, 210-110-702, 01/11/81.

[60] - International Telephone Service Network Management, Traffic Engineering. Recomendações E.4001 - E.600, Livro Vermelho CCITT, Vol. II, Fascículo II.3, 1984.

[61] - Budri, A. K. - SIMTRAF Manual do Usuário. 1991.

[62] - Budri, A. K. - ANATRAF Manual do Usuário. 1991.