

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
UNICAMP

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS  
COM A VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO

ORIENTANDO

*José Cecílio Espinal Mencia*

ORIENTADOR

*Michel Daoud Yacoub*

*Tese apresentada na faculdade de Engenharia  
Elétrica, Departamento de Comunicações,  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Elétrica*



**JANEIRO DE 1991**

Este exemplar corresponde à relação final da  
defendida por *José Cecílio Espinal*  
*Mencia* e sua orientadora Com  
Julgadora em *11 / 01 / 91*

*Michel Daoud Yacoub*  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Toda minha gratidão a meu orientador prof<sup>o</sup> Dr. Michel Daoud Yacoub, por sua incansável dedicação e apoio durante todo o período de estudos, e principalmente nos momentos mais difíceis, demonstrando ser mais que um professor, um amigo.

Meu reconhecimento a todos os colegas e amigos que comigo compartilharam conhecimentos e sabedoria, injusto seria citar apenas alguns nomes.

Agradeço à minha família, que apesar de distante fez-me sentir seu carinho e confiança.

Devo agradecer também às seguintes instituições:

- à UNICAMP pela oportunidade oferecida e apoio em todos os níveis
- à Empresa Hondurenha de Telecomunicações HONDUTEL, pela licença de trabalho concedida
- à CAPES pelo suporte financeiro

Finalmente agradeço com muito amor à minha esposa Denise, por todo seu apoio, paciência e compreensão.

A

Denise

Renata e

Priscila

com muito carinho

# ÍNDICE

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

I.1-Rádio Móvel.....	2
I.2-Rádio Móvel Celular.....	3
I.3-Principais Conceitos.....	6
I.4-Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego.....	9
I.4.1-Usos de Antenas Direcionais.....	9
I.4.2-Algoritmos de Alocação de Canais.....	11
I.5-"Directed Retry".....	12
I.6-Variação do Limiar de Bloqueio.....	14
I.7-Assinantes com Acesso a mais de uma Célula.....	15
I.8-Benefícios Potenciais do Encaminhamento Alternativo.....	19

## CAPÍTULO II

### VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO

II.1-Introdução.....	22
II.2-Limiar de Bloqueio.....	23
II.3-Variantes do Algoritmo.....	25

## CAPÍTULO III

### LITERATURA REVISADA

III.1-Aspectos Gerais Em Telefonia Móvel Celular.....	28
III.2-Técnicas de Alocação de Canais.....	30
III.2.1-Publicações sobre Alocação Fixa de Canais.....	30
III.2.2-Publicações sobre Alocação Adaptativa de Canais.....	32
III.2.3-Publicações sobre Alocação Dinâmica de Canais.....	32
III.2.4-Publicações sobre Alocação Híbrida de Canais.....	33

III.2.5-Publicações sobre Alocação de Canais Por Empréstimo .....	33
---	----

#### CAPÍTULO IV

##### MODELO DE TRÁFEGO

IV.1-Introdução .....	35
IV.2-Processo de Markov .....	36
IV.3-Modelo de Processo de Markov para uma Célula .....	39
IV.4-Modelo de Processo de Markov para duas Células .....	41

#### CAPÍTULO V

##### PARÂMETROS DE TRÁFEGO E MEDIDAS DE DESEMPENHO

V.1-Introdução .....	46
V.2-Parâmetros de Tráfego .....	46
V.3-Probabilidades de Transição .....	48
V.4-Estratégia de Encaminhamento e Alternativas .....	49
V.5-Medidas de Desempenho .....	57
V.6-Método Computacional .....	59
V.7-Estrutura do Algoritmo .....	60

#### CAPÍTULO VI

##### SOLUÇÕES ANALÍTICAS

VI.1-Bloqueio Médio para Valores Limites de Flexibilidade e Limiar de Bloqueio .....	65
VI.2-Bloqueio Médio em Função do Desbalanceamento .....	66
VI.3-Bloqueio Médio versus Flexibilidade .....	70
VI.4-Aproximação para Baixo Tráfego .....	71
VI.5-Comparação Inicial entre as Alternativas .....	74

#### CAPÍTULO VII

##### RESULTADOS OBTIDOS

VII.1-Bloqueio Médio versus Desbalanceamento .....	78
VII.2-Bloqueio Médio versus Flexibilidade .....	83

VII.3-Bloqueio Médio versus Tráfego.....	85
VII.4-Modelo Computacional versus Modelo Analítico	
Aproximado.....	87

## CAPÍTULO VIII

### CONCLUSÕES

VIII.1-Principais Conclusões.....	91
VIII.2-Considerações Finais.....	94
VIII.3-Trabalhos Futuros.....	95
 BIBLIOGRAFIA.....	 96

## RESUMO

Muitos aspectos de projetos de sistemas de Rádio Móvel Celular e medidas de desempenho são estudados considerando as fronteiras entre as células como fixas. Na realidade, as fronteiras não são bem definidas e mudam devido a que a propagação de rádio é variável, tanto em espaço como em tempo. Se um assinante móvel se encontra perto da fronteira entre duas células, ele poderá ter boa comunicação com mais de uma estação base.

O objetivo deste trabalho é o estudo do desempenho de tráfego de um sistema de rádio móvel celular, onde o tráfego da fronteira entre duas células é utilizado para técnicas de encaminhamento alternativo. A estratégia proposta se baseia na variação do limiar de bloqueio, de cada uma das células envolvidas.

Nesta técnica o que se propõe é direcionar os assinantes com acesso a mais de uma estação rádio base, para aquela com menor número de canais ocupados, antes mesmo que sua própria célula fique com todos seus canais bloqueados. O momento da tomada de decisão do re-roteamento é definido pelo valor do limiar de bloqueio escolhido, que pode assumir um valor entre 0 e  $N+1$ , onde  $N$  é o número de canais em cada célula.

Utilizando os processos de Markov, e particularmente os processos de nascimento e morte, implementou-se um modelo computacional que permite avaliar um sistema, através da probabilidade de bloqueio, variando-se os parâmetros de flexibilidade, desbalanceamento, tráfego, etc, existentes entre duas células.

Além da análise numérica (programa computacional) foram feitas aproximações analíticas para os casos especiais.

Conclui-se através dos resultados das simulações realizadas, que a utilização da técnica Variação do Limiar de Bloqueio, melhora substancialmente o desempenho de tráfego do sistema de comunicação móvel onde esta é aplicada.

oooooooooooooooooooo

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### I.1-Rádio Móvel

A partir da invenção do rádio em finais do século XIX, pensou-se na potencialidade da comunicação com pontos não fixos [1] sem a utilização de enlaces físicos. As primeiras aplicações foram em navios para auxílio na navegação; a partir daí, o uso do rádio móvel cresceu de uma maneira surpreendente. Na atualidade, este tipo de comunicação se estende também a veículos em terra e no ar, sendo utilizada a nível individual através de equipamentos portáteis.

Os primeiros sistemas de rádio móvel convencionais, consistiam de uma estação base com um transmissor instalado geralmente a grandes altitudes. A área de cobertura era muito grande e o número de canais disponíveis pequeno, sendo estes sistemas inicialmente operados manualmente. Havia escassez de canais e grande consumo de energia como problemas operacionais.

Por volta de 1955 [2] foi introduzida na Europa a telefonia móvel automática que, mesmo com os problemas da escassez de canais, conseguiu combinar o sistema de rádio a um comutador, utilizando sinalização inteligente. Essa combinação proporcionou aos assinantes as mesmas facilidades de um telefone normal, e ainda mais, o assinante passou também a ter acesso a outras áreas além da área de cobertura de sua própria unidade de controle.

A demanda por serviços de rádio móvel aumentou muito rapidamente: de sistemas com um número pequeno de canais, sinalização precária e modularidade limitada, se evoluiu para a

concepção de sistemas versáteis onde o usuário pode deslocar-se com seu aparelho de comunicação (voz, dados) por toda a área de serviço, sem que haja a necessidade de qualquer intervenção do usuário no sentido de manter a conexão estabelecida, ou seja, o sistema de rádio móvel atual tende a oferecer as mesmas facilidades da telefonia fixa, com a vantagem adicional da mobilidade.

## 1.2-Rádio Móvel Celular

Um sistema de telefonia móvel tem como finalidade permitir que assinantes móveis possam comunicar-se entre si e/ou com assinantes fixos (e vice-versa), para o que neste último caso, a rede pública deverá estar envolvida.

O sistema de rádio móvel é constituído de três componentes básicos: a estação móvel, a estação rádio base e a central de comutação de rádio móvel. A estação móvel que tanto pode ser uma unidade móvel instalada no carro, como uma unidade transportável ou um modelo portátil, comunica-se por meio de rádio com a estação rádio base, a qual se conecta por meio de fios a uma central telefônica. Para se chegar a implementar um sistema de rádio móvel foi necessário resolver uma série de questões técnico operacionais [3], entre as quais podemos citar as seguintes

- Faixa de frequências
- Limite de alcance
- Obstáculo do relevo à propagação
- Identificação dos terminais
- Dimensão da rede móvel
- Densidade muito variável dos terminais nos centros urbanos, etc.

Os sistemas de rádio (telefonia) móvel convencionais "apostam" na disponibilidade de frequências de rádio. Na realidade estas frequências são recursos bastante escassos, estritamente

controlados por órgãos governamentais.

A depender dos sistemas convencionais, pouco se falaria em comunicações móveis nos dias de hoje. Na década de 70, no entanto, um novo sistema de telefonia móvel surgiu, sendo este sistema baseado em propostas, de fato antigas mas, que nunca foram implementadas por deficiência da tecnologia.

O sistema de rádio móvel celular, como ficou conhecido, divide a região geográfica em módulos de atendimento, denominados células, cada uma delas servidas por uma estação base. Um grupo de células formam um "cluster", onde todos os canais disponíveis são utilizados. O sistema, então, é composto de vários "clusters" para se atingir a área de cobertura necessária.

Com isto, as frequências utilizadas em uma célula poderiam ser repetidas em outras células, dentro de determinadas regras para limitar os efeitos da interferência. Como a densidade de telefones móveis é também muito variável entre o centro das cidades e a periferia, a dimensão das células combina-se a quantidade de canais da estação rádio base para atender a demanda de tráfego. Deste modo, pode-se hoje, com os sistemas de telefonia móvel celular, alcançar os assinantes nas áreas metropolitanas, nas principais auto-estradas e até cobrir todo o país ou vários países, atendidos por um sistema móvel celular integrado.

Nesta última década temos presenciado um extraordinário progresso na tecnologia de telefonia móvel. As facilidades proporcionadas pelos centros de controle CPA, as técnicas de sinalização por canal comum entre eles, aliadas à alta tecnologia de hoje, permitem comutar automaticamente uma conexão telefônica à medida que o móvel se desloca de célula em célula e transferi-la a outra estação rádio base quando se degeneram as condições de transmissão. Hoje, muitos serviços oferecidos aos assinantes fixos, de centrais CPA, tais como, chamada em espera, discagem abreviada, conferência, etc, podem ser extendidos aos assinantes móveis. Graças à operação simples do

terminal móvel, à qualidade de transmissão, à cobertura geográfica e aos múltiplos serviços que oferece a seus usuários, a telefonia móvel vem progredindo rapidamente.

Os usos do serviço de rádio móvel celular ampliam-se cada vez mais. Os mais frequentes estão vinculados a atividades e profissionais que necessitam de uma forma de comunicação mais dinâmica ou que não possuem local fixo de trabalho, como por exemplo, transportes, empreiteiras de construção civil, montagem eletromecânica, médicos, prestadores de serviços de manutenção, etc.

O uso crescente da telefonia móvel, obrigou a busca de soluções para o aumento da capacidade de tráfego e da capacidade final de terminais. Foram desenvolvidos assim, sistemas cada vez maiores, que obrigaram inclusive o uso de faixas de frequências mais adequadas (800 e 900 MHz), onde o espectro é menos densamente utilizado.

A estrutura básica de um sistema de telefonia móvel engloba os seguintes elementos: MSC, RBS e MS (ver Fig-1).

MSC- ("Mobile Switching Center") é o centro de controle e comutação dos canais de telefonia móvel, com a tecnologia Controle por Programa Armazenado (CPA). O MSC constitui o ponto de interconexão da rede móvel celular com os sistemas de telefonia fixa.

RBS- ("Radio Base Station") a estação rádio base, é onde se encontra o equipamento rádio transmissor/receptor, a unidade interface com o MSC, e a torre com as antenas.

MS- ("Mobile Station") a unidade móvel que é o equipamento terminal do assinante.

PSTN- ("Public Switched Telephone Network") é a central de telefonia fixa através da qual assinantes móveis e fixos podem se

comunicar.

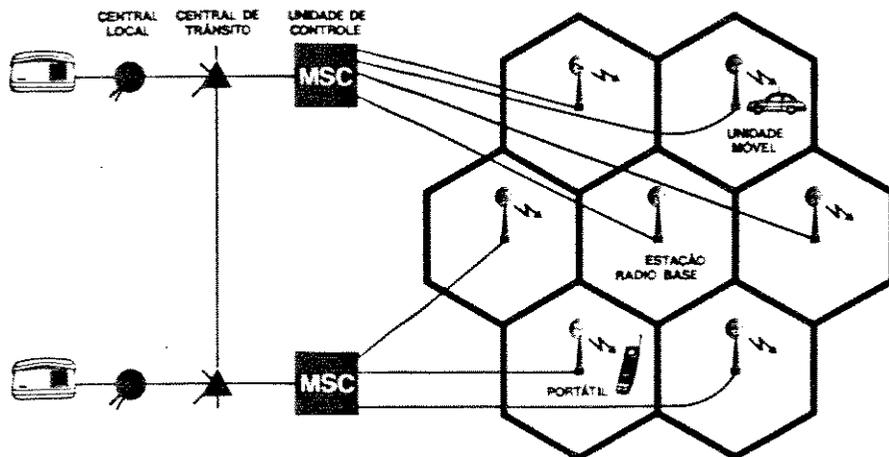


Fig-1 Estrutura Básica de um Sistema de Telefonia Celular

### I.3-Principais Conceitos

O sistema de telefonia móvel é modular e a sua capacidade é ampliável pela adição de mais RBS's e, dentro destas, de maior número de canais, bem como pela instalação de novas MSC's, criando outros centros de controle e outras regiões.

A seguir serão definidos alguns conceitos básicos:

a.- Área de Controle

Cada MSC serve a uma região de um país ou a todo ele. A essa área atendida por uma MSC se denomina área de controle ou área de serviço.

b.- Área de Localização

As MSC's se subdividem em áreas de localização (Cluster) cada uma delas composta por certa quantidade pré estabelecida de células.

### c.- Canais

Uma estação rádio base (RBS) dispõe de certa quantidade de canais em função da capacidade de tráfego prevista na célula. Existem basicamente dois tipos de canais: canais de controle e canais de voz. Os canais de controle têm as seguintes funções: o canal de transmissão a partir da RBS é o canal de busca ("paging"), através do qual se chama pela identidade o móvel desejado; o canal de controle de recepção na RBS é o canal de acesso, através do qual o móvel solicita acesso ao sistema para iniciar uma chamada ou para atender ao "paging". Os demais canais estão dispostos aos pares, formando um circuito "full-duplex" e denominam-se canais de voz ou canais de tráfego.

### d.- "Hand-Over"

Ao processo de transferência de uma MS de uma RBS para outra na fase de conversação, denomina-se "Hand-over". Exemplificando: durante a conversação, a MS está se deslocando; a RBS que contém o canal associado a essa ligação, monitora permanentemente a relação S/R (sinal/ruído); se esta cair abaixo do valor pré-determinado, a RBS informa à MSC. Esta, por sua vez, verifica se em RBS's adjacentes há uma com canal de tráfego livre com melhores condições de transmissão. Caso positivo, a conexão é transferida para a nova RBS. Caso negativo, a conexão permanece na RBS original. Se a qualidade de transmissão degradar de tal modo que a conversação se torne incompreensível, a MSC desconecta a chamada.

### e.- "Roaming"

Quando uma MS se desloca nas células periféricas de uma área de controle, haverá uma redução progressiva da relação S/R à medida que a MS se afasta da última RBS desta área de controle. Caso não haja outra área de controle contígua, a chamada será desfeita quando a relação S/R cair abaixo de um valor mínimo programado. Caso o móvel penetre em uma área de controle adjacente, a MSC visitada informa sua nova posição à MSC original, automaticamente via sinalização por canal comum,

(CCITT-7) como no sistema europeu, ou manualmente, como no sistema americano. As chamadas à MS são feitas pela sua numeração normal (código de área e número local) e encaminhadas normalmente à MSC original do assinante. Esta, entretanto, tem registrada a área de controle visitada e com esta informação reencaminha a conexão à MSC visitada, que completa a chamada. A tarifação é enviada pela MSC visitada para a MSC da área da MS. Este processo se denomina "Roaming".

As chamadas às MS's são feitas usando sua numeração independentemente da localização nas outras áreas sendo o processo descrito abaixo.

Quando uma chamada é destinada a uma MS, transmite-se a chamada em paralelo a todas as RBS's da área de localização onde ela se encontra, pelo canal de busca ("paging"). A MS reconhece o número como o seu próprio e confirma pelo canal de controle (Acesso) para a MSC (ver Fig-2). Esta designa um canal de tráfego para a fase de conversação. A MS se conecta ao canal de tráfego designado e a MSC verifica se a intensidade do sinal está acima do mínimo necessário e completa a chamada. Caso contrário, a MSC procura nas RBS's adjacentes um canal de melhor qualidade de sinal e transfere a conexão, para esta última completar a ligação.

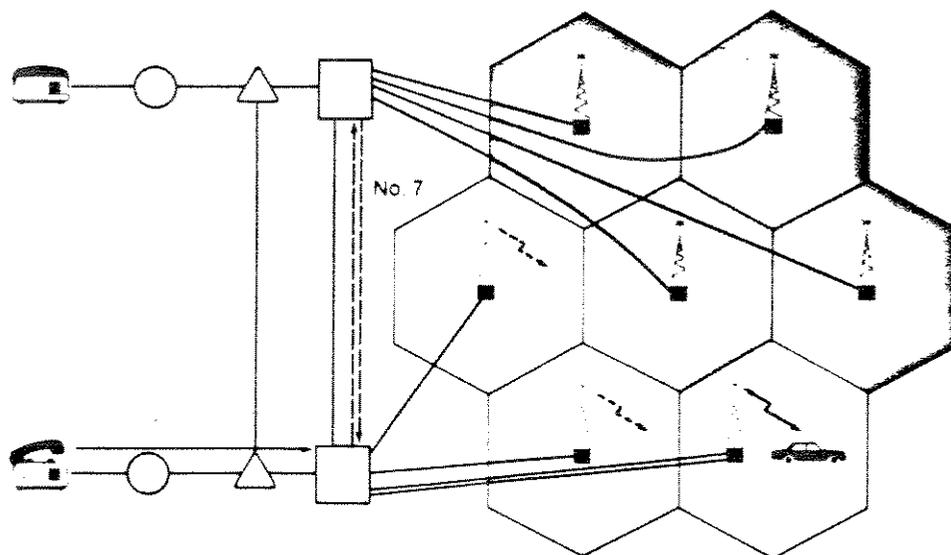


Fig-2 Processo de uma Chamada (RBS->MS)

Uma chamada originada por uma MS se inicia quando, após teclado o número desejado, é acionado o botão de despacho. A MS ocupará um canal de controle (Acesso) e enviará sua identidade e o número desejado. A MSC analisa a categoria da MS chamadora e verifica se está autorizada a operar. O número chamado é também analisado. No caso da MS estar autorizada a completar essa chamada, a MSC informa à MS a que canal de tráfego deverá conectar-se, após o que, a chamada será completada. Sendo a chamada bem sucedida, far-se-á a supervisão da qualidade de transmissão (monitoramento) no canal de tráfego.

#### I.4-Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego

A telefonia móvel é o segmento de maior crescimento do setor das telecomunicações [2]. A demanda por este serviço cresce assustadoramente a cada dia e, com o objetivo de cobrir esta demanda crescente, várias técnicas que melhoram o desempenho dos sistemas têm sido propostas. Algumas destas técnicas serão brevemente descritas a seguir.

##### I.4.1-Uso de Antenas Direcionais

Seguindo o mesmo princípio que originou a transição de sistemas convencionais para o sistema celular, ou seja, o fato de dividir grandes áreas de cobertura por pequenas áreas ou células, se continuou aplicando a divisão de áreas geográficas nos sistemas atuais, com o objetivo de dispor de mais células por área, e conseqüentemente, de mais canais disponíveis em cada área, resultando em um tráfego maior a ser escoado.

A Fig-3 mostra um exemplo de divisão de células onde A, B e C constituem o sistema antes da divisão e E, F e G representam as células geradas depois da divisão do sistema. Este processo de divisão das células pode ser feito sempre que for necessário [4], porém existem alguns problemas que surgem na divisão, e que devem

ser levados em consideração:

- a.- A distância entre as células é reduzida, e em decorrência disto mais interferência de co-canal aparece.
- b.- A tolerância para a localização das antenas é reduzida, o que dificulta a localização apropriada.
- c.- O custo do sistema é incrementado pelo uso de maior número de estações base (RBS).

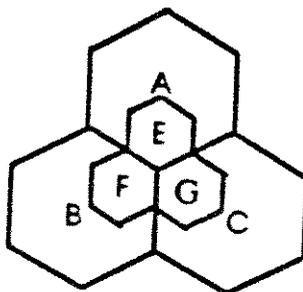


Fig-3 Exemplo de Divisão de Células

O uso de antenas direcionais é uma alternativa para a técnica de divisão das células, pois tem a vantagem de reduzir os custos, evitando a instalação de novas estações base [5] e também a interferência de co-canal [6]. O método consiste em se dividir a célula em setores, onde cada setor pode ser considerado uma nova célula: três e seis setores são os mais habitualmente utilizados. A Fig-4 ilustra um arranjo de três setores dentro de uma célula, o que equivale à divisão de uma célula em três novas células.

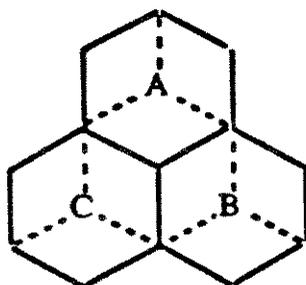


Fig-4 Arranjo de Células

#### I.4.2- Algoritmo de Alocação de Canais

O eficiente uso dos canais determina um bom desempenho de qualquer sistema, e pode ser obtido por diferentes técnicas de alocação de canais [4]. Os sistemas atuais utilizam unicamente a alocação fixa, embora alguns sistemas combinam alocação fixa com o "Directed Retry" [4]. A seguir serão descritas brevemente algumas das técnicas de alocação de canais já conhecidas:

##### a.- Alocação Fixa de Canais

Nesta técnica um número fixo de canais do sistema é alocado a cada célula. Estes mesmos canais são alocados também a outra célula respeitando-se a distância requerida, que permite a re-utilização das frequências minimizando, deste modo, a interferência de co-canal. Se todos os canais de uma célula estão ocupados, uma possível chamada que apareça na área de cobertura dessa célula será bloqueada. Esta técnica funciona bem quando o perfil de tráfego é bem conhecido e estável. Entretanto, uma repentina variação deste, pode causar distúrbios no sistema.

##### b.- Alocação Dinâmica de Canais

Esta técnica se baseia em um algoritmo que contém um número de estratégias com as características comuns de todos os canais do sistema, estes por sua vez, estão disponíveis para todas as células. A alocação de canais é feita de acordo com a dinâmica da demanda dos usuários. Esta técnica tem um bom desempenho quando a distribuição de tráfego não é uniforme, porém dá maus resultados para altas cargas de tráfego [8].

### c.- Alocação Híbrida de Canais

Esta técnica é uma combinação das duas anteriores. Uma parte da capacidade da célula é pré-alocada de forma fixa, e o resto dos canais é alocado de forma dinâmica de acordo com o comportamento do tráfego. O desempenho desta técnica depende tanto da distribuição de tráfego, como da relação de canais fixos/canais dinâmicos.

### d.- Alocação de Canais por Empréstimo

Nesta técnica, uma célula que tem todos seus canais ocupados procura um canal livre na célula vizinha; se nesta célula vizinha não existem canais livres, então a chamada é bloqueada.

A implementação de qualquer das técnicas de alocação de canais mencionadas acima, à exceção da primeira (alocação fixa), implica a utilização de uma unidade de controle de processamento central onde cada chamada é tratada desde o início até o final independentemente do tipo de tráfego. As dificuldades destas técnicas radicam precisamente no processamento, que tem a ver com o comportamento do sistema como um todo. Os sistemas podem ser melhorados se as decisões são tomadas não de maneira centralizada, mas sim dentro de cada área, e definindo qual tipo de tráfego ou chamadas serão plausíveis de tratamento especial.

## I.5-"Directed Retry"

"Directed Retry" é outra técnica de alocação de canais para melhoria do desempenho de um sistema de telefonia móvel, tendo sido testado em alguns sistemas. Os resultados desta técnica servirão para comparações com a nossa proposta "Variação do Limiar de Bloqueio", que será apresentada no capítulo II. "Directed Retry" é também conhecida como ARB ("Adaptative Response to Blocking") investigada no trabalho "Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries"[4].

A estrutura celular é um modelo ideal. Na prática a área de cobertura de um sistema de rádio não coincide com a forma hexagonal, e toma diversas formas de acordo com os obstáculos que o sinal transmitido encontra no seu caminho de propagação [10]. A Fig-5 mostra uma área de cobertura hipotética para um sistema de rádio móvel celular, onde é comparada com a área hexagonal ideal. Na figura observa-se que existem áreas superpostas ("Overlaps"). Se uma MS encontra-se nessa área poderá ter boa comunicação com mais de uma estação base.

Em um sistema sem "Directed Retry", às MS's são alocados canais unicamente de sua própria célula, i.é, da célula na qual se encontra localizada no momento (uma MS se define como localizada em determinada célula, sendo esta aquela que recebe o melhor sinal de rádio).

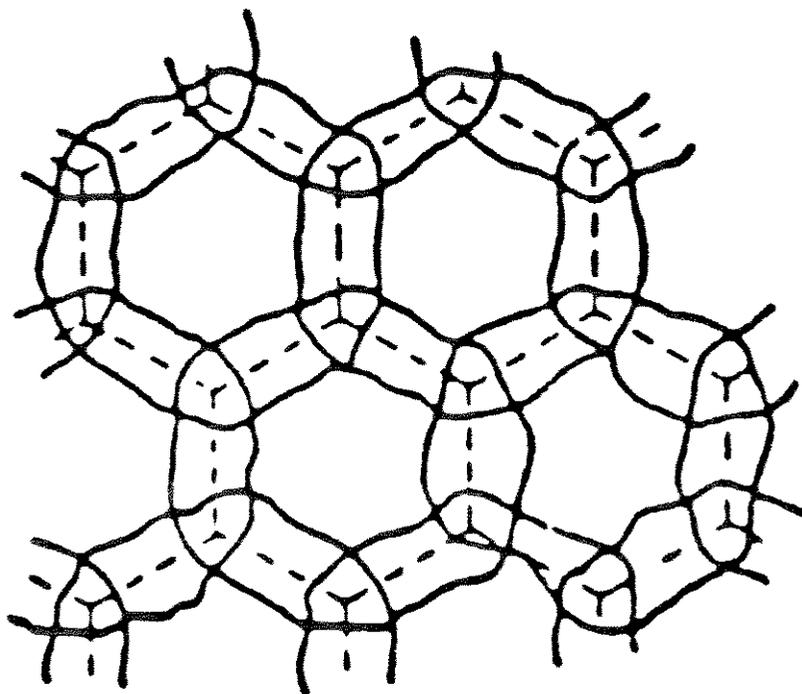


Fig-5 Área de Cobertura Hipotética

Em sistemas que usam "Directed Retry", às MS's podem ser alocados canais das outras células que rodeiam aquela na qual a MS se encontra localizada. Esta facilidade, aumenta o número de canais

potenciais, e em decorrência disto, o aumento de sua utilização. O procedimento é o seguinte: quando a MSC recebe pelo canal de acesso uma solicitação de uma chamada, estando todos os canais de voz da célula ocupados, sinaliza para a MS para que teste a qualidade do sinal dos canais das células adjacentes. A mensagem que a MS recebe da MSC contém a identificação de vários canais de acesso. A MS mede a intensidade dos sinais. Se a qualidade de qualquer um deles é a requerida, a chamada é realizada [10]. Neste modelo se deve assumir que:

- a.-As chamadas originadas em uma célula têm a distribuição de Poisson e tempo constante de chegada.
- b.-O tempo de ocupação se assume exponencialmente distribuído
- c.-Uma certa proporção dos assinantes de cada célula pode se comunicar com mais de uma estação base.
- d.-MS's chamada e chamadora devem ser de diferentes células.

Para medir o desempenho desta técnica dois modelos têm sido utilizados: analítico e de simulação de Monte Carlo [4].

Provou-se, tanto analiticamente (para casos particulares) e através de análise numérica (para os casos gerais)[4], como através de simulação de Monte Carlo [10], que o emprego da técnica "Directed Retry" melhora em aproximadamente 20% o desempenho do sistema, ou seja, o sistema poderá escoar 20% a mais de tráfego.

#### I.6-Variacão do Limiar de Bloqueio

Variacão do Limiar de Bloqueio é o nome da técnica de alocação de canais proposta neste trabalho de tese, o qual tem como objetivo melhorar o desempenho de um sistema de telefonia móvel.

Nesta estratégia, o que se propõe é permitir que os assinantes com acesso a mais de uma estação base, possam utilizar os canais das células envolvidas antes mesmo que sua própria célula fique com todos os canais ocupados. Desta maneira estaremos, de certa forma, variando o limiar de bloqueio das células.

Este é o estudo objetivo deste trabalho e será investigado nos próximos capítulos. Em particular, o Capítulo-II mostra com mais detalhes os conceitos envolvidos e as variantes do algoritmo.

### I.7-Assinantes com Acesso a Mais de uma Célula

Muitos aspectos de projetos de sistemas de rádio móvel celular e medidas de desempenho dos sistemas são estudados considerando as fronteiras entre as células como fixas. Na realidade, as fronteiras não são bem definidas e mudam devido a que a propagação de rádio é variável tanto em espaço como em tempo.

Se uma MS se encontra perto da fronteira entre duas células, pode ter comunicação adequada com mais de uma célula. Esta propriedade serve como base para a determinação do tráfego alternativo.

O primeiro passo na avaliação das estratégias de encaminhamento alternativo é estimar a proporção de tráfego que será disponível para ser tratado como flexível.

Como já foi dito anteriormente, a forma hexagonal das células em um sistema de telefonia móvel é considerada como um modelo ideal. Se considerarmos antenas omnidirecionais sendo usadas, a área de cobertura teria um formato que mais se aproxima a de um círculo. Conseqüentemente, existe uma intersecção natural destas áreas servidas por estações bases vizinhas e isto está representado pela região hachureada na Fig-6.

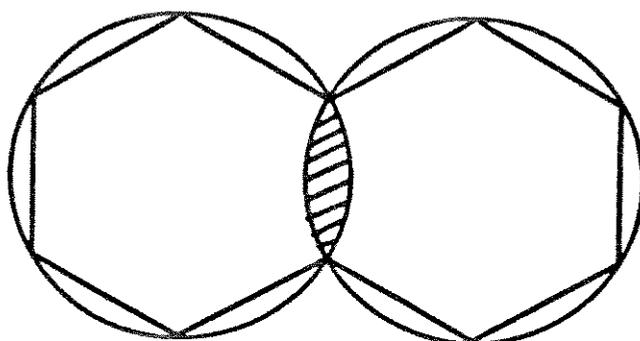


Fig-6 Interseccão das Áreas de Cobertura

Se definimos  $\gamma$  como sendo a área de interseccão com sete estações base tomadas duas a duas:

$$\gamma = \text{Área de interseccão} / \text{Área total}$$

através de cálculos simples constata-se que  $\gamma$  (da Fig-7) é de aproximadamente 21%. Se assumimos que as MS's estão distribuídas uniformemente dentro das células, podemos afirmar que 21% das MS's estão dentro das fronteiras não definidas, podendo ser atendidas por ambas as estações base.

Por outro lado, os sistemas de telefonia móvel são flexíveis, ou seja, são projetados com uma região de interseccão natural para permitir que o "Hand-over" possa ser feito de forma a não prejudicar a conexão estabelecida [4]. Esta flexibilidade permite uma adaptabilidade para quando a condição de "Hand-over" não puder ser realizada imediatamente, seja porque não existam canais livres, ou porque uma outra tarefa de maior prioridade esteja sendo realizada no momento do "Hand-over" ser requisitado.

Se considerarmos duas células hexagonais com raio  $R$  e um contorno de Hand-over com raio  $r$  (ver Fig-7), definimos  $P$  como

Pode-se ver que para uma penetração de 20% temos uma área de intersecção de 36% e, assumindo-se uma distribuição uniforme das MS's então, 36% do tráfego total pode ser considerado como tráfego flexível ou alternativo.

A teoria desenvolvida neste item não tem a pretensão de estimar o valor real da proporção de assinantes com acesso a mais de uma estação base, mas serve como uma ilustração de como este tráfego flexível potencialmente existe e pode ser realmente de valor substancial.

Uma estimativa mais rigorosa deste tráfego pode ser encontrada em [4] onde, levando-se em conta as propriedades da rádio propagação em sistemas de comunicações móveis, determinou-se a proporção de tráfego flexível ( $\gamma$ ) em função da tolerância (dB) dos caminhos de rádio das estações móveis para duas ou mais estações base. Note-se que para uma tolerância de 6dB a proporção de tráfego flexível pode chegar a valores entre 30 e 40%, ver Fig-9 que de fato é bastante substancial.

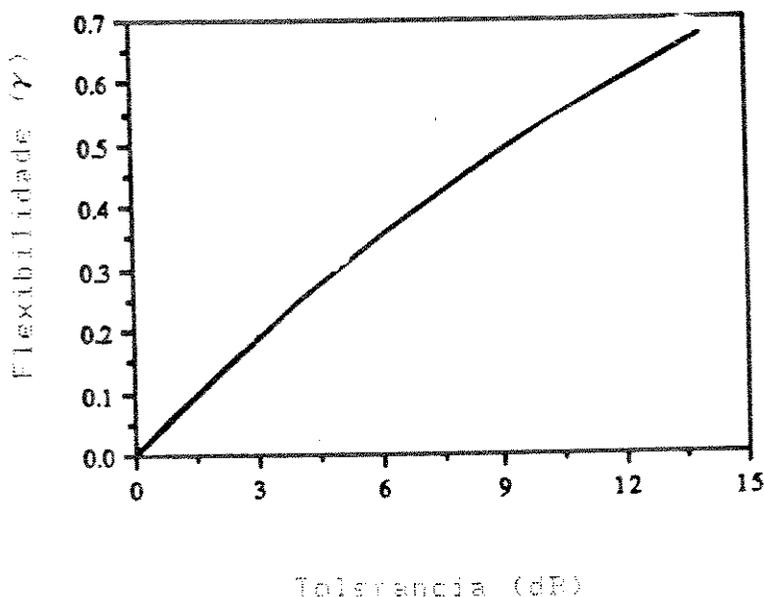


Fig-9 Proporção de Tráfego Flexível em Função da Tolerancia

## I.8-Benefícios Potenciais do Encaminhamento Alternativo

Para se apreciar os benefícios potenciais do encaminhamento alternativo consideremos dois casos extremos:

- a.-Fronteiras sem intersecção ( $\gamma = 0$ ), ou seja, as células estão completamente isoladas umas das outras, i.é, tão logo a MS cruza a fronteira é realizado o "Hand-over".
- b.-Células com intersecção total ( $\gamma = 1$ ), ou seja, as duas células podem ser consideradas como uma só, onde as MS's podem ter acesso a todos os canais das duas células, com a condição de que o estado de bloqueio das células seja conhecido (ver Fig-10).

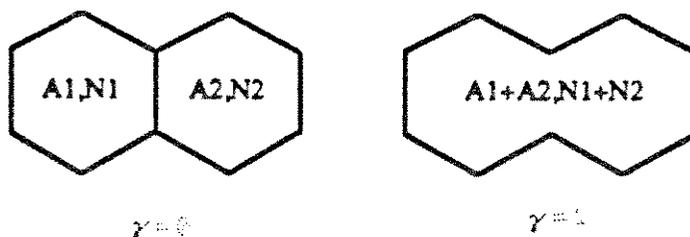


Fig-10 Casos Extremos de Fronteiras não Definidas

Na Figura-10  $A_1$ ,  $N_1$  e  $A_2$ ,  $N_2$  são o tráfego e o número de canais das células 1 e 2 respectivamente. Então, calculando-se o bloqueio médio do sistema temos:

$$B_{ma} = [ A_1 \cdot E(A_1, N_1) + A_2 \cdot E(A_2, N_2) ] / ( A_1 + A_2 ) \quad (2a)$$

$$B_{mb} = E(A_1+A_2, N_1+N_2) \quad (2b)$$

Onde  $E(A, N)$  é a fórmula Erlang-B.

Pode-se ver que  $B_{mb} < B_{ma}$  para  $A_1$ ,  $N_1$  ou  $A_2$ ,  $N_2$  diferentes de zero. Como exemplo, se  $A_1=4$ ,  $N_1=5$ ,  $A_2=1$ ,  $N_2=5$  temos:

$$B_{ma} = 16\%$$

$$Bmb = 1,8\%$$

obviamente esses dois casos extremos não se aplicam à realidade, porém servem para se conjeturar a respeito da potencialidade de melhoria de tráfego com o uso de técnicas de encaminhamento alternativo.

Considerando ainda o sistema de duas células com o mesmo desbalancamento entre si, porém com um fator de penetração de 21%, resulta uma flexibilidade de 37,5% (ver Fig-11). Se o tráfego alternativo é dirigido para a célula 2 o sistema fica balanceado, cada um carregando 2,5erl sendo o bloqueio médio de 7%. Se uma das células está bloqueada então 37,5% do tráfego pode ser desviado para a célula não bloqueada.

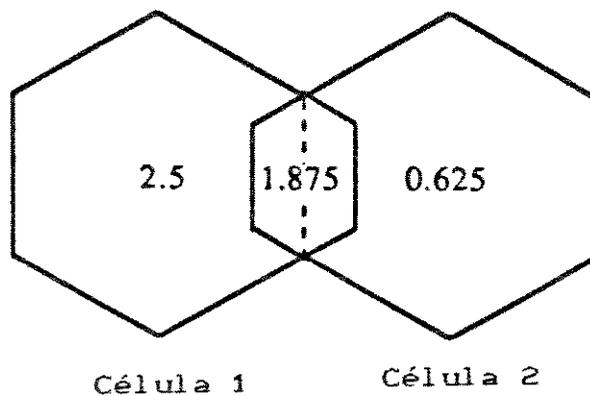


Fig-11 Sistema de 2 Células com 37% de Flexibilidade

Concluindo, temos três tipos de tráfego no sistema: o tráfego fixo da célula 1, o tráfego fixo da célula 2 e o tráfego flexível ou alternativo que tanto pode ser cursado por uma ou outra célula (ver Fig-12).

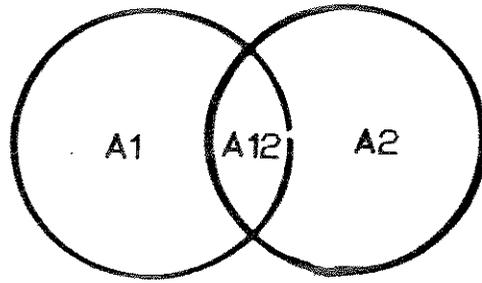


Fig-12 Tipos de Tráfego

O algoritmo proposto manipula o tráfego flexível variando-se o limiar de bloqueio, desde o sistema com todos os canais reservados até o sistema com todos os canais livres.

Nos próximos capítulos serão tratadas as teorias e os parâmetros utilizados na estruturação de nossa proposta "Variação do Limiar de Bloqueio", bem como os resultados obtidos no modelo computacional e suas conclusões.

oooooooo000000oooooooo

## C A P Í T U L O   I I

### VARIAÇÃO DO LIMIAR DE BLOQUEIO

#### II.1-Introdução

No capítulo anterior foram tratados aspectos gerais que influenciam, de certa forma, nos sistemas de telefonia móvel, às vezes como limitantes, ou também, possibilitando a concepção de novas idéias que tendem a melhorar o desempenho destes sistemas. Alguns desses aspectos são, por exemplo, disponibilidade limitada de freqüências, técnicas de alocação de canais complexas e de alto custo de implementação, fronteiras não definidas entre as células que garantem a existência do tráfego flexível, etc.

Neste capítulo introduziremos a idéia da proposta "Desempenho de um Sistema de Telefonia Móvel com Variação do Limiar de Bloqueio", que tem como característica principal o tratamento do tráfego alternativo ou flexível. Nesta proposta, o processamento dos dados poderá ser feito localmente dentro de cada área servida por uma MSC ("Mobile Switching Centre"), pois os parâmetros envolvidos para a tomada de decisão do algoritmo proposto são parâmetros que envolvem no máximo, pares de células contíguas. Estes parâmetros são:

- Número de canais por célula
- Número de canais ocupados por célula
- Tráfego oferecido à célula
- Desbalanceamento entre células contíguas
- Proporção de tráfego flexível entre células contíguas

O objetivo de qualquer sistema de comunicação é o tratamento do tráfego (voz, dados), e a maioria das inovações tendem à melhoria da capacidade de escoamento deste. Nossa proposta, está precisamente voltada à melhoria da capacidade de tratamento do tráfego de um sistema de telefonia móvel celular, para o que, será implementado um modelo computacional, utilizando duas células (RBS's), com o mesmo número de canais em cada uma. O desempenho do modelo proposto será avaliado em termos do bloqueio médio, em função da variação dos parâmetros acima mencionados. Comparações destes resultados com dados de técnicas já simuladas, como a "Directed Retry" [4] (mencionada previamente) e sistemas que não utilizam encaminhamento alternativo, serão apresentadas mais adiante.

## II.2-Limiar de Bloqueio

Como já foi mencionado no capítulo anterior, as fronteiras entre as células não são bem definidas, e suas áreas de cobertura em alguns pontos se sobrepõem, permitindo com isto, o surgimento do que conhecemos como tráfego flexível. Assim, o tráfego oferecido ao sistema pode ser dividido em três tipos de tráfego:

- Tráfego fixo da célula 1 (A1)
- Tráfego fixo da célula 2 (A2)
- Tráfego alternativo (A12)

O tráfego fixo, é aquele gerado pelas estações móveis (MS-Mobile Station) que têm boa comunicação unicamente com a estação rádio base (RBS-Radio Base Station) na qual se encontram localizadas no momento do início de uma chamada.

O tráfego alternativo, é aquele gerado pelas MS's que têm boa comunicação com as duas células (RBS), e que pode ser escoado por qualquer uma delas, dependendo da sua condição em termos de ocupação de canais, e das estatísticas do comportamento de tráfego, como será visto mais adiante.

Recordemos, do capítulo anterior, que a técnica de roteamento "Directed Retry" divide as células (com que o assinante com tráfego flexível pode comunicar-se), em duas categorias:

- 1).- Célula de primeira opção: é a própria célula do assinante com a qual a comunicação é melhor;
- 2).- Célula de segunda opção: é a célula alternativa, com a qual a comunicação pode não ser tão boa mas, ainda adequada.

A célula de segunda opção só é tentada no caso em que a célula de primeira opção estiver bloqueada (todos os canais ocupados).

Imagine agora que, ao invés disso, passemos a tentar a célula de segunda opção antes mesmo que a de primeira opção esteja bloqueada. O objetivo é tentar evitar bloqueio utilizando-se os recursos disponíveis (no caso, a célula de segunda opção). Consideremos cada célula do sistema em questão com capacidade de  $N$  canais. Define-se  $L$  ( $0 \leq L \leq N+1$ ) como o limiar de bloqueio com que cada célula operará. Por conveniência, adotaremos o mesmo limiar para todas as células. O limiar de bloqueio  $L$  indica o ponto a partir do qual a célula de primeira opção com  $L$  canais ocupados será evitada, cedendo lugar à célula de segunda opção que deverá ser tentada. A célula de segunda opção será a escolhida para escoar este tráfego, se esta apresentar um número de canais ocupados inferior ao limiar de bloqueio estabelecido. Caso contrário, a chamada deverá permanecer na célula de origem.

Assim, para  $L = N+1$  o sistema opera sem célula de segunda opção; é o caso dos sistemas de comunicações móveis, como os de hoje, que não utilizam o tráfego flexível para técnicas de roteamento alternativo. Neste caso, o bloqueio médio pode ser calculado diretamente pela fórmula Erlang-B (as células estão isoladas umas das outras).

No caso em que  $L = N$ , a estratégia coincide com o "Directed Retry", em que a célula de segunda opção é tentada somente quando a célula de primeira opção tiver todos os seus canais ocupados (ou seja  $L = N$ ).

Variando-se  $L$  de  $N + 1$  até zero poderemos verificar o desempenho do sistema de acordo com os vários parâmetros envolvidos. Em particular para  $L = 0$  a estratégia consiste em enviar o tráfego flexível para a célula com menor número de canais ocupados.

Qual a implicação no desempenho do sistema quando se varia o limiar de bloqueio? Existe um limiar ótimo? Qual o compromisso entre o limiar e os parâmetros de tráfego? Todas as questões deverão ser exploradas no decorrer deste trabalho.

Poderíamos ainda, tentar definir o limiar de bloqueio dinamicamente de acordo com o desbalanceamento do tráfego médio entre as células, no sentido de levá-las à condição de balanceamento (equilíbrio de tráfego). No entanto, este é um trabalho que poderá ser explorado futuramente no prosseguimento deste.

### II.3-Variantes do Algoritmo

Até agora, estamos supondo que ao se transferir uma chamada para a célula de segunda opção, esta estará em um estado tal que o número de canais ocupados seja menor do que a célula de primeira opção; se for o contrário, a chamada deverá permanecer na própria célula.

Imaginemos agora, que a partir do limiar de bloqueio (quando as chamadas flexíveis terão a opção dos dois caminhos), ambas as células apresentam o mesmo número de canais ocupados. Qual a decisão tomada pelo algoritmo?

Propõem-se três alternativas:

- Alternativa 1: Manter o tráfego flexível na própria célula
- Alternativa 2: Repartir o tráfego flexível igualmente entre as células
- Alternativa 3: Enviar o tráfego flexível para célula menos sobrecarregada para compensar o desbalanceamento de tráfego, caso exista.

As consequências e implicações são as seguintes:

Na Alternativa 1 a idéia é deixar a chamada flexível na célula de primeira opção. De fato, se optarmos por esta alternativa, o desbalanceamento do tráfego médio entre as células poderá diminuir, mas a taxa de diminuição deverá ser pequena já que a tendência é manter o tráfego flexível como está. Note que isto ocorre apenas nos estados em que as células apresentam o mesmo número de canais ocupados.

Na Alternativa 2 o tráfego flexível será dividido entre as duas células. Em termos práticos, isto se constitui em, ora mandar o tráfego para a célula de primeira opção, ora para a de segunda opção na ocorrência de estados de ocupação de canais coincidentes em ambas as células.

Na Alternativa 3, como estamos interessados em compensar o desbalanceamento, a idéia seria enviar o tráfego flexível sempre para a célula de segunda opção; tenta-se com isto descarregar o tráfego para a célula menos sobrecarregada. Espera-se, portanto, que o equilíbrio de cargas seja alcançado mais rapidamente do que nas Alternativas 1 ou 2. Note que em todas as alternativas mencionadas temos o que podemos chamar de "decisão cega", ou seja, não levamos em conta a informação do desbalanceamento médio entre as células, o que nos permitiria estabelecer a tendência do tráfego.

No entanto, se no instante do estabelecimento das chamadas a informação do desbalanceamento do tráfego médio entre as células estiver disponível, as decisões poderão ser tomadas considerando-se mais este parâmetro. Este desbalanceamento pode ser estimado levando-se em conta a condição de tráfego anterior das células, podendo inclusive ser utilizados algoritmos de previsão de tráfego para tomada de decisões futuras (dentro dos próximos minutos, etc). Não nos cabe, no entanto, entrar no mérito desta questão.

No estudo que estaremos realizando, vamos supor que este parâmetro de desbalanceamento seja disponível, e o desempenho do sistema será avaliado levando-se em conta este parâmetro também, o que permitirá um balanceamento mais eficaz. Porém, devemos lembrar que estas observações são para o caso das células apresentarem o mesmo número de canais ocupados. De qualquer forma, a tendência do algoritmo é a de levar o sistema ao estado de equilíbrio de cargas (balanceamento), pois o tráfego flexível sempre será dirigido para a célula menos carregada (instantaneamente).

Com a aplicação da variação do limiar de bloqueio, além do balanceamento do sistema, potencialmente o tráfego fixo tem um tratamento melhor, pois é reduzida a probabilidade deste encontrar o sistema bloqueado. Se levarmos em conta os estudos realizados, e que estimam que o tráfego flexível gira em torno de 40%, isto nos dá uma idéia de quanto o tráfego fixo melhora potencialmente a sua probabilidade de ser escoado. Para esclarecer, damos como exemplo, o funcionamento da maioria dos sistemas: se uma chamada considerada tráfego fixo surgir e a célula estiver com todos seus canais ocupados, a chamada será bloqueada. Neste mesmo caso porém, considerando a proposta de encaminhamento alternativo, parte dessas chamadas ( $\pm 40\%$ ) têm a possibilidade de reencaminhamento para outra célula, permitindo assim, a possibilidade que as chamadas consideradas fixas, encontrem canais livres na mesma célula. Este tipo de análise (reencaminhamento), no entanto, não será feita neste trabalho, podendo servir como sugestão para futuras investigações. Além disto, esta estratégia poderia ser utilizada para os "Hand-overs", o que também não será aqui analisado.

## C A P Í T U L O III

### LITERATURA REVISADA

Neste capítulo citaremos parte da literatura publicada que contem aspectos que consideramos importantes e concernentes ao desempenho de tráfego do sistema de telefonia móvel através de uso de algoritmos de alocação de canais. O capítulo é dividido em duas secções, sendo a primeira dedicada a aspectos gerais, e a outra ao tema específico de técnicas de alocação de canais, mencionadas no primeiro capítulo.

#### III.1-Aspectos Gerais em Telefonia Móvel Célular

Nos anos 1970-71 Staras e Schiff [18] [19] publicaram considerações básicas para a implementação de sistemas de telefonia celular, usando alocação de canais fixa e dinâmica.

MacDonald [16], e Young [1] publicaram dois "papers" em 1979, dando uma boa introdução à história da telefonia celular, bem como seus principais conceitos.

Em 1981 Bakry e Ackroyd [22], publicaram uma análise de teletráfego considerando: tráfego de assinantes móveis para assinantes fixos; fixos para móveis e móveis para móveis. As fórmulas de bloqueio derivadas, se aplicam a sistemas de telefonia móvel sem "Hand-over", ou seja uma geração anterior à do conceito atual de telefonia móvel celular.

Em 1982 Cox [21], publicou um trabalho sobre os efeitos da interferência de co-canal, onde é usado o conceito de reutilização de frequências. A proposta de Cox consiste em dividir os canais de rádio disponíveis em um grupo de canais de reutilização.

Em 1981 foi estendida a análise do teletráfego para um sistema multicelular, através do trabalho de Bakry e Ackroyd [20].

Em 1985 Macfadyen e Everitt [23] publicaram, "Os efeitos do "Hand-over" no Tráfego Total do Sistema", concluindo através de estudos realizados, que o número de assinantes móveis entrando e saindo de uma célula é equilibrado, pelo que, o "Hand-over" não afeta significativamente a capacidade do sistema.

Em 1985 Posner e Guérin [24] publicaram um estudo com o objetivo de minimizar o bloqueio de "Hand-over", propondo, (i) reservar canais unicamente para "Hand-over", (ii) colocar o "Hand-over" numa fila de espera, (iii) ou uma combinação de ambas. A deterioração em bloqueio de uma nova tentativa de chamada causada por essas propostas é considerada relativamente pequena.

Em 1985, Avellaneda, Panda e Brody [25] propuseram outro algoritmo com o objetivo de melhorar o bloqueio de "Hand-over". Usaram a área comum entre células adjacentes para repartir o tráfego, forçando o "Hand-over" para as células com canais livres. Sugeriram também a reserva de canais para dar prioridade ao "Hand-over".

Em 1985, Chan [26] fez considerações sobre a interferência de canal adjacente, causada pelo uso de rádio frequências adjacentes em uma célula, ou em células vizinhas. Considerando ambas as direções de transmissão (MSC para MS e vice-versa), ele sugere que a interferência de canal adjacente não ocorre quando canais adjacentes são utilizados em células adjacentes.

Em 1985, Hughes e Appleby [27] descreveram a base para a determinação dos parâmetros, (i) distância mínima para o reuso de

frequências, (ii) interferência de canal adjacente, e (iii) aspectos técnicos e comerciais dos sistemas de telefonia celular.

Em 1986, Cattermole [28] fez um estudo sobre a área comum entre as células, onde uma MS pode ter boa comunicação com duas ou mais RBS's. Este princípio é também utilizado por Yacoub [4] para melhorar a probabilidade de bloqueio, através de métodos de roteamento alternativo.

Em 1986, Hong e Rappaport [29] desenvolveram modelos analíticos aproximados para os efeitos do "Hand-over" em sistemas de telefonia móvel. Propuseram dois esquemas de prioridade para o "Hand-over": em primeiro lugar alguns canais são reservados para o "Hand-over", e em segundo lugar os Hand-over são colocados numa fila.

Em 1986, Lee [30] propôs um critério para a interferência de co-canal em sistemas setorizados, ele também se refere à separação requerida entre canais para evitar a interferência de canal adjacente.

### III.2-Técnicas de Alocação de Canais

Nesta secção será apresentada a literatura revisada para cada uma das técnicas de alocação de canais mencionadas no Capítulo I deste trabalho.

#### III.2.1-Publicações sobre Alocação Fixa de Canais

O problema de alocação de canais para as células em um sistema de rádio móvel é similar ao problema de alocação de cores diferentes a áreas adjacentes em um grafo. Alguns conceitos teóricos sobre coloração de grafos podem ser encontrados em [31,32]

Em 1973, Bron e Kerbosch [33] publicaram um trabalho onde se ilustra a complexidade do uso das técnicas de grafos. O algoritmo para encontrar todos os ciclos de um grafo requer bastante tempo de CPU para um sistema com muitos nós, ou células no caso de sistemas de telefonia móvel. O conhecimento destes ciclos é a base para a solução de alocação de canais. Estas soluções são aproximadas, e são elaboradas para solução de sistemas não muito complexos.

Em 1977, Zoellner e Beall [35] apresentaram uma avaliação de processos de alocação de frequências baseadas em teorias de grafos.

Em 1978, Box [36] publicou uma técnica heurística. No algoritmo proposto, a alocação de canais é feita de acordo com uma prioridade inicial estimada; se esta falhar uma outra é estimada até encontrar a solução adequada.

Em 1980, Hale [34] fez um estudo onde mostrava a equivalência de problemas de coloração de grafos, com problemas de alocação de canais. Ele mostrou que a solução de alguns problemas pode ser encontrada através de algoritmos computacionais.

Em 1985, Dikoku e Ohdate [37] apresentaram um método para a obtenção do número ótimo de canais para um "cluster", quando se usa um sistema com células pequenas.

Em 1985, Gardiner e Kotsopoulos [52] fizeram um estudo sobre a mínima separação entre canais adjacentes permanentemente alocados a uma célula. Eles apresentaram uma comparação do número de canais disponíveis por célula como uma função do tamanho do "cluster", e a mínima separação entre canais.

Em 1985, Meyerhoff [53] desenvolveu um método de ótima configuração de alocação de canais (fixos) considerando interferência de co-canal e separação de canais adjacentes.

Em 1986, Chan e Mahmoud [54] propuseram um algoritmo de alocação eficiente, do espectro de frequência, provendo uma distribuição de canais, livres de interferências.

### III.2.2-Publicações sobre Alocação Adaptativa de Canais

Em 1985, Ackroyd e Smith [55] sugeriram uma técnica, porém não encontramos referências da sua implementação.

Em 1986, Tajima e Imamura [56] propuseram um procedimento para a alocação adaptativa, chamada de alocação flexível de canais. Seu algoritmo é estudado em um sistema de 12 células e um total de 56 canais.

### III.2.3-Publicações sobre Alocação Dinâmica de Canais

Em 1970, Schiff [57] propôs um sistema puramente dinâmico, feito com a intenção de encontrar uma solução analítica.

Em 1971-72, Cox e Reudink [58] [44] publicaram uma série de estudos de simulação de técnicas de alocação de canais. Usaram estes estudos de simulação para mostrar os problemas de sistemas com muitos canais e muitas áreas de serviço.

Até 1985 vários autores, Sengoku entre eles, tinham publicado [45,46] estudos de sistemas de telefonia móvel fazendo uso da teoria de grafos. A representação de alocação de canais em um sistema de telefonia móvel, foi aproximada ao problema da coloração; depois foi mostrado que soluções exatas para sistemas com muitas células e muitos canais é impraticável [33,48]. As suas soluções embora assumindo muitas simplificações, implicam em alto consumo de tempo de CPU.

Em 1982, Gamst e Rave [49] propuseram um algoritmo usando um número mínimo de canais alocados dinamicamente.

Em 1983, Grevel e Seachs [50] propuseram um modelo discreto para teletráfego móvel.

Em 1986, Furuya e Akaiwa [38] propuseram um esquema de separação de canais. Esta técnica envolve uma seleção de canais de acordo com uma lista de prioridades.

### III.2.4-Publicações sobre Alocação Híbrida de Canais

Até 1984 vários autores, entre os quais Georganas, tinham publicado vários estudos de simulação de técnicas de alocação híbrida de canais. Modelos de tráfego simplificados (incluindo unicamente interferência de co-canal) são simulados usando-se alocação híbrida de canais [39,40,41].

Em 1985, During [42] derivou fórmulas analíticas aproximadas para bloqueio de teletráfego móvel. A análise é feita levando-se em consideração problemas de interferência de co-canal, unicamente.

Em 1986 Arazi [43] publicou uma nova técnica de alocação híbrida de canais, com o objetivo de criar condições favoráveis para o "Hand-over".

### III.2.5-Alocação de Canais por Empréstimo

Em 1973 Engel e Peritsky [59] propuseram um algoritmo de alocação de canais por empréstimo, onde os canais são alocados às células como fixos e não fixos ou canais emprestáveis. Simulação destes estudos são feitos por Anderson [60]. Elnubi e Gupta [61] fizeram novas versões desta técnica.

Em 1985, Seriguchi, Ishikawua, e Sawada [62] propuseram uma técnica de empréstimo forçado, onde uma célula é requerida mesmo tendo todos os seus canais ocupados.

Neste capítulo foi citada parte da literatura revisada, e que servirá como referência para qualquer leitor que queira aprofundar-se em alguns temas específicos que formam parte deste trabalho.

É importante notar que, devido à complexidade do tema, fórmulas analíticas fechadas não são viáveis, o que leva este tipo de investigação a fazer uso de ferramentas mais gerais como as das técnicas de simulação.

Neste trabalho utilizaremos a análise numérica através de programas computacionais e fórmulas analíticas para os casos especiais. Tudo isto será tratado em capítulos subsequentes.

oooooooooooooooooooo

## CAPÍTULO IV

### MODELO DE TRÁFEGO

#### IV.1-Introdução

No capítulo II vimos que o tráfego flexível ou alternativo é o campo de aplicação da nossa proposta "Desempenho de um Sistema de Comunicação Móvel Celular com a Variação de Limiar de Bloqueio". Também mostrou-se que a proporção de estações móveis que podem ter boa comunicação com mais de uma estação rádio base é relativamente grande, o que permite a utilização das técnicas de roteamento alternativo.

Neste capítulo, mostraremos as ferramentas utilizadas no modelamento da nossa proposta, em termos de processos de tráfego, dando principal atenção para a aplicação em um sistema de duas células. De fato, devemos reconhecer que existem restrições a serem feitas quanto a esta análise simplificada, uma vez que em um sistema real, "clusters" maiores interagem. No entanto, o processo conjunto de duas células serve como guia para se entender os fenômenos que se esperam de um sistema maior, dando portanto, uma ideia qualitativa e não quantitativa do desempenho do sistema.

A análise de sistemas maiores é extremamente complicada se se levar em conta todos os fenômenos envolvidos, tais como, distribuição não uniforme de tráfego, "hand-over", etc. Esta análise é, de certa forma, facilitada com o uso da simulação de Monte Carlo. Entretanto, ao se partir diretamente para a simulação, poderíamos estar perdendo a oportunidade de conhecer mais

profundamente a resposta do sistema, já que a simulação pode ser dispendiosa e demorada. Com a escolha de um sistema de duas células, é possível ainda explorar o sistema através de análise numérica com a manipulação de todos os parâmetros dentro da total faixa de variação possível dos mesmos. Uma vez conhecidos os principais fenômenos, a simulação, sem dúvida, seria o próximo passo para a avaliação completa da estratégia.

#### IV.2-Processos de Markov

O processo de tráfego de um sistema de telefonia celular, que tem dependência mútua de tráfego, pode ser modelado através dos processos de Markov e, em particular, através dos processos de nascimento e morte.

Os processos de nascimento e morte correspondem a uma classe especial de processos de Markov. Esses processos podem ser discretos ou contínuos no tempo, sendo que a única condição imposta é que as transições de estados se façam somente entre estados vizinhos; isto é, seja  $x_n$  um estado qualquer no instante  $n$  tal que  $x_n = i$ , então  $x_{n+1} = i-1, i, \text{ ou } i+1$  e nenhum outro valor. A transição de  $i$  para  $i+1$  corresponde a um nascimento, e a transição de  $i$  para  $i-1$  corresponde a uma morte [11]. Usaremos a seguinte notação:

- $\lambda_n$  = taxa de nascimento, que descreve a taxa com a qual os nascimentos ocorrem numa determinada população de tamanho  $n$ .
- $\mu_n$  = taxa de morte, que descreve a taxa com a qual as mortes ocorrem numa população de tamanho  $n$ .

Consideremos um processo de Markov a estado discreto e tempo contínuo que é caracterizado por um conjunto de  $n$  estados e um conjunto  $P_{ij}$  que define a probabilidade de transição do estado  $i=1, \dots, n$  para o estado  $j=1, \dots, n$ .

A característica mais importante do processo de Markov é que

a probabilidade  $P_{ij}$  depende apenas dos estados  $i$  e  $j$ , sendo completamente independente dos estados visitados anteriormente. Podemos chamar esta característica de "falta de memória" de um processo Markoviano.

A característica de falta de memória tem como consequência que o tempo de passagem de um estado  $i$  para um estado  $j$  é exponencialmente distribuído, ou seja, a função de densidade de probabilidade (fdp) do tempo de passagem do estado  $i$  para o estado  $j$  é dada por:

$$f_{ij}(t) = \lambda_{ij} \cdot e^{-\lambda_{ij} t} \quad (1)$$

onde  $\lambda_{ij}$  é a taxa de transição do estado  $i$  para o estado  $j$ .

Dado que o processo está no estado  $i$ , ou seja, dado que não houve transição para fora do estado  $i$ , a probabilidade de que a transição ocorra em  $(t+\Delta t)$  é [11]:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= f_{ij}(t) \Delta t / F_{ij}(t) = p(t < x_{ij} \leq t + \Delta t) \Delta t / p(x_{ij} > t) \\ &= \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \Delta t / e^{-\lambda_{ij} t} \\ &= \lambda_{ij} \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

Conhecendo as probabilidades de transição  $P_{ij}$  é possível escreverem-se as equações de estado para se determinar a probabilidade  $P_i(t)$ .

Onde

$$P_i(t) = p(\text{que o processo esteja no estado } i \text{ no instante } t)$$

e  $i = 1, \dots, n$ .

Consideremos, como exemplo, um processo com dois estados: um servidor pode estar livre ou em serviço. Se ele está livre (L), com

probabilidade  $\lambda\Delta t$ , passa para a condição de "em serviço" (S) e, caso esteja em serviço, é liberado com probabilidade  $\mu\Delta t$  (ver Fig-1) [11].

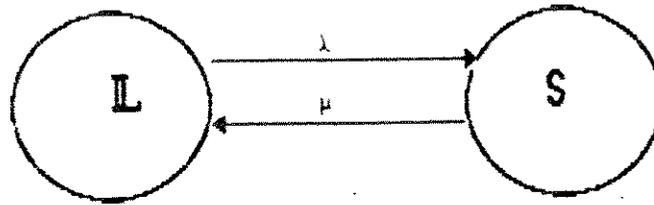


Fig-1 Processo com dois Estados

As equações de estado podem ser escritas da seguinte maneira:

$$p_L(t+\Delta t) = p_L(t) (1-\lambda\Delta t) + p_S(t)\mu\Delta t$$

$$p_S(t+\Delta t) = p_L(t)\lambda\Delta t + p_S(t) (1-\mu\Delta t)$$

De onde

$$[p_L(t+\Delta t) - p_L(t)] / \Delta t = -p_L(t)\lambda + p_S(t)\mu$$

$$[p_S(t+\Delta t) - p_S(t)] / \Delta t = p_L(t)\lambda - p_S(t)\mu \quad (3a)$$

No limite quando  $\Delta t$  tende a 0 temos

$$p_L(t) = -p_L(t)\lambda + p_S(t)\mu$$

$$p_S(t) = p_L(t)\lambda - p_S(t)\mu \quad (3b)$$

Onde  $p_L = dp_L(t) / dt$  e  $p_S = dp_S(t) / dt$

Podemos ainda escrever a equação acima na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} p_L(t) \\ p_S(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_L(t) \\ p_S(t) \end{bmatrix} \quad (3c)$$

A matriz:

$$\begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix}$$

é chamada matriz de taxas de transição do processo Markoviano.

Para resolver o sistema de equações acima poderíamos usar, por exemplo, a transformada de Laplace. Porém, como estamos interessados apenas na determinação das probabilidades estacionárias, torna-se apropriado o uso de um procedimento mais imediato, baseado no equilíbrio de fluxos [13]. Consideremos o processo a dois estados representado na Fig-2.

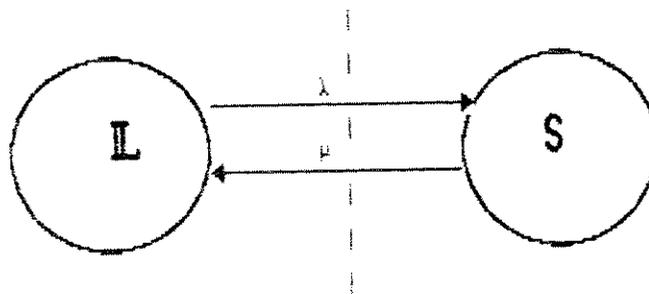


Fig-2 Equilíbrio de Fluxos

O equilíbrio de fluxos, através da fronteira pontilhada, estabelece que a taxa de passagem pela fronteira, nos dois sentidos, deve ser igual. Na forma matemática:

$$\lambda \cdot p_L = \mu \cdot p_S \quad (4)$$

com a condição que

$$p_L + p_S = 1 \quad (5)$$

então, usando (4) e (5)

$$p_L = \mu / (\mu + \lambda) \quad \text{e} \quad p_S = \lambda / (\mu + \lambda)$$

#### IV.3-Modelo de Processo de Markov para uma Célula

Os estados instantâneos de um sistema são representados pelo número de canais. A transição de um estado  $i$  para um estado  $i+1$ , corresponde a uma nova demanda, ou nascimento; a transição de um estado  $i$  para um estado  $i-1$  corresponde a uma partida, ou morte. Assumimos, que a probabilidade de transição depende unicamente do estado atual e independe de qualquer outra variável. Isto implica processos de chegada poissonianos e tempo de retenção com distribuição exponencial negativa. Um diagrama de estados para um processo de nascimento e morte é ilustrado na Fig-3, onde  $\lambda_{i-1}$  é a taxa de chegada ao estado  $i$  e  $\mu_i$  é a taxa de serviço no estado  $i$ .

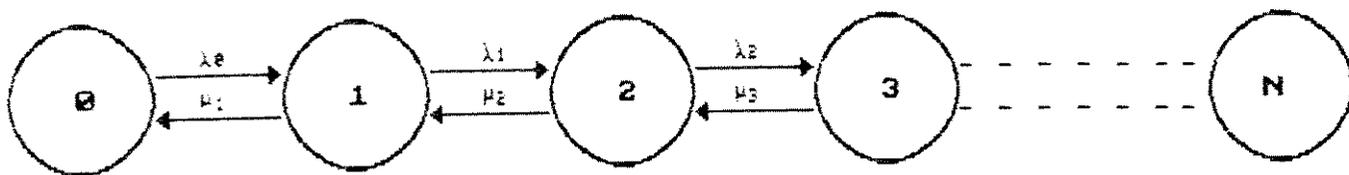


Fig-3 Diagrama de Estados Unidimensional

Utilizando-se o equilíbrio de fluxos

$$\lambda p_0 = \mu p_1 \Rightarrow p_1 = \lambda / \mu p_0$$

$$\lambda p_1 = \mu p_2 \Rightarrow p_2 = \lambda / \mu p_1 \Rightarrow p_2 = (\lambda_0 \lambda_1 / \mu_1 \mu_2) \cdot p_0$$

$$p_2 \lambda = p_3 \mu \Rightarrow p_3 = \lambda / \mu p_2 \Rightarrow p_3 = (\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 / \mu_1 \mu_2 \mu_3) \cdot p_0$$

Genericamente temos que:

$$p_k = \left( \prod_{i=0}^{k-1} \lambda_i / \prod_{i=1}^k \mu_i \right) \cdot p_0 \quad (6)$$

Ou 
$$p_k = C_k \cdot p_0$$

onde

$$C_k = \prod_{i=0}^{k-1} \lambda_i / \prod_{i=1}^k \mu_i$$

Como no equilíbrio,

$$\sum_{k=0}^N p_k = 1$$

Temos que

$$p_0 \sum_{k=0}^N C_k = 1, \text{ com } C_0 = 1$$

Então

$$p_k = C_k / \left( \sum_{k=0}^N C_k \right)$$

Se assumirmos que o tempo de serviço é independente do estado então  $\mu_k$  é proporcional a  $K$ ; se o tráfego oferecido é constante e igual a  $A$ , então  $\lambda_k = A$ . Assim:

$$p_k = (A^k / k!) / \left( \sum_{j=0}^k A^j / j! \right)$$

que é a distribuição de Erlang. Se o bloqueio ocorre unicamente no estado  $N$ , então:

$$p_N = (A^N / N!) / \left( \sum_{j=0}^N A^j / j! \right) \quad (7)$$

que é a fórmula de Erlang-B.

#### IV.4-Processo de Markov para Duas Células

Todos os conceitos dos processos de Markov descritos até aqui, podem ser aplicados para qualquer número de células. No nosso caso particular, será utilizado um modelo com duas células com

dependência mútua de tráfego. Obviamente, se não existisse essa mútua dependência de tráfego cada célula poderia ser tratada separadamente como foi visto no item anterior (II.3). O diagrama de estados para o modelo de duas células é mostrado na Fig-4, onde consideramos as células 1 e 2 com N canais cada.

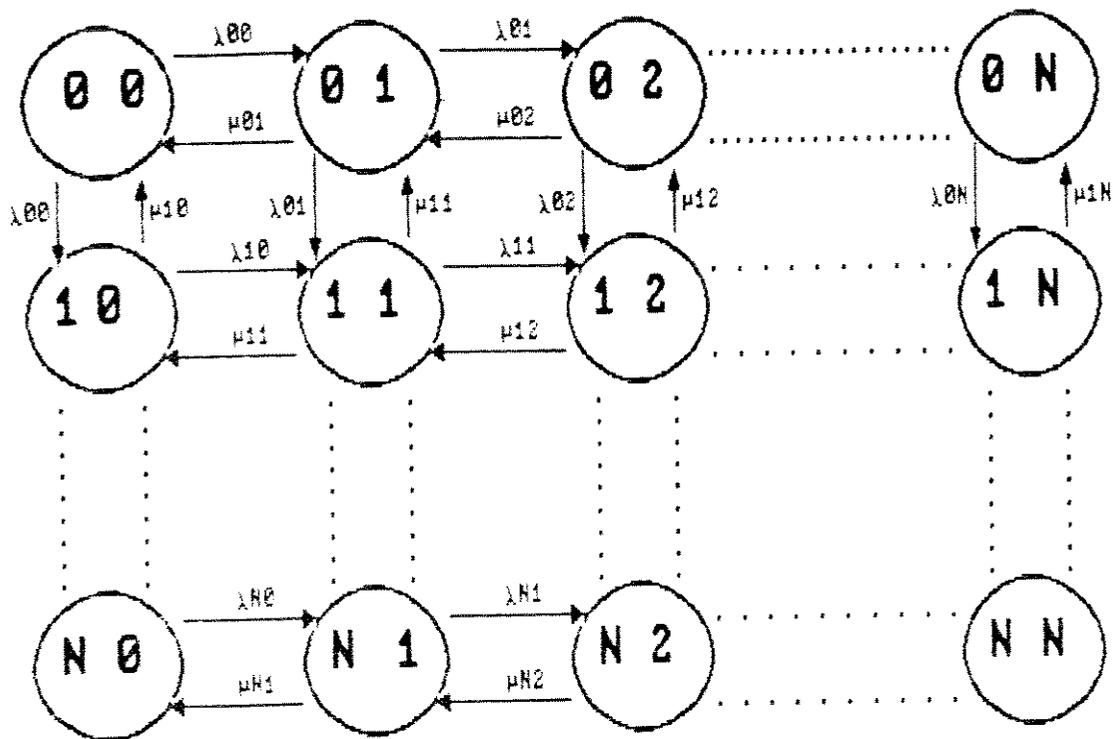


Fig-4 Diagrama de Estados Bidimensional

O número de estados é um vetor com duas componentes, sendo estas componentes o número de canais ocupados em cada célula. Definiremos duas taxas de ocupação e duas taxas de serviço:  $\lambda_{1,j}$  e  $\lambda_{2,j}$  são as taxas de ocupação para a célula 1 e célula 2 respectivamente, e  $\mu_{1,j}$  e  $\mu_{2,j}$  são as taxas de serviço da célula 1 e célula 2 respectivamente

O modelo unidimensional dado no item II.3 é aplicado no caso de utilização de uma célula. No nosso modelo, são utilizadas duas células o que dá um diagrama de estados bidimensional, onde um estado genérico  $(i,j)$  é cercado por quatro possíveis estados vizinhos, como é mostrado na Fig-5.

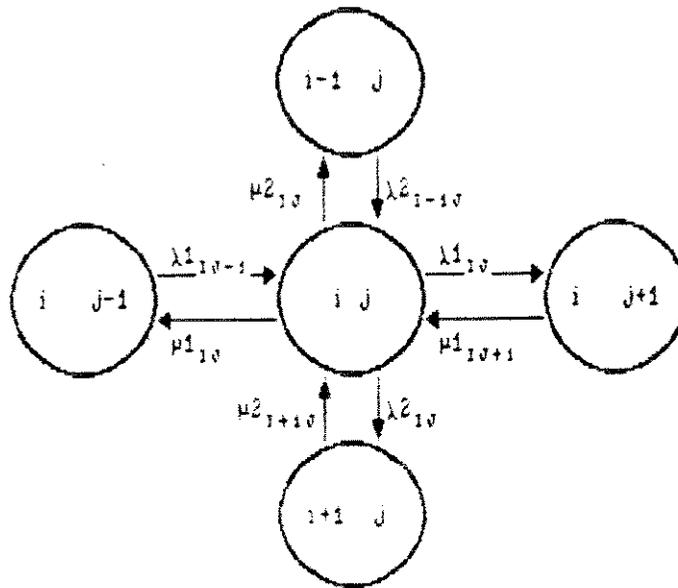


Fig-5 Estados vizinhos

A equação de equilíbrio para o estado genérico  $(i, j)$  pode ser escrita como:

$$\begin{aligned}
 & -(\lambda_{1_{ij}} + \mu_{1_{ij}} + \lambda_{2_{ij}} + \mu_{2_{ij}})P_{ij} + \mu_{1_{i,j+1}}P_{i,j+1} + \lambda_{1_{i,j-1}}P_{i,j-1} \\
 & + \mu_{2_{i+1,j}}P_{i+1,j} + \lambda_{2_{i-1,j}}P_{i-1,j} = 0 \quad (8)
 \end{aligned}$$

onde  $P_{xy}$  é a probabilidade de estado de equilíbrio a ser encontrada. Escrevendo a equação anterior para todos os  $(N+1)(N+1)$  estados, encontramos um sistema de  $(N+1)(N+1)$  equações com o mesmo número de incógnitas. Colocando essas equações na forma matricial teremos:

$$\mathbf{M.P} = \mathbf{Z} \quad (9)$$

sendo que  $\mathbf{M}$  é uma matriz, de ordem  $[(N+1)(N+1)] \times [(N+1)(N+1)]$  de coeficientes (matriz estocástica);  $\mathbf{P}$  é um vetor coluna de dimensão  $(N+1)(N+1)$  (probabilidades dos estados de equilíbrio), e

que, pode ser combinada com (9) para eliminar a indeterminação. Então, definimos  $M'$  que será igual a  $M$  com a diferença que a enésima linha é substituída por um vetor de "ums". Definimos também  $Z'$  que é o vetor de zeros tendo seu enésimo elemento substituído por "um". Assim:

$$M'P = Z'$$

ou

$$P = M'^{-1} Z'$$

Que é o vetor das probabilidades de equilíbrio de estado. Uma vez que  $Z'$  contém apenas um elemento não nulo e este é igual a "um", a solução do sistema (Probabilidade dos Estados de Equilíbrio) é dada pela enésima coluna de  $M'^{-1}$ .

Até aqui, temos o nosso modelo de tráfego com duas células, que permitirá analisar o desempenho da nossa proposta em termos de probabilidade de bloqueio. A definição dos parâmetros que serão utilizados será tema do próximo capítulo.

0000000000000000

## C A P Í T U L O V

### PARÂMETROS DE TRÁFEGO E MEDIDAS DE DESEMPENHO

#### V.1-Introdução

No capítulo IV foi abordado o modelo de tráfego necessário para a técnica proposta. Neste capítulo, trataremos dos parâmetros de tráfego e parâmetros de desempenho, e apresentaremos o método computacional utilizado.

Em relação à nossa proposta, "Variação do Limiar de Bloqueio", temos até aqui o modelo de tráfego necessário e a quantidade estimada do tráfego flexível disponível nas fronteiras entre células vizinhas. O passo a seguir, após a definição dos parâmetros neste capítulo, será uma possível solução analítica do modelo proposto.

#### V.2-Parâmetros de Tráfego

Para completar o modelo de tráfego proposto no capítulo IV, é necessário definirem-se os parâmetros que nos permitirão avaliar o desempenho do sistema dentro de um conjunto de situações que poderíamos encontrar em um sistema real. Os parâmetros a serem definidos são:

- Tráfego total oferecido ao sistema: tráfego ( $A$ )
- Proporção de tráfego flexível: flexibilidade ( $\gamma$ )
- Desbalanceamento entre as células: desbalanceamento ( $\beta$ )

Além destes três parâmetros consideramos ainda o número de canais

em cada célula; no nosso caso particular estaremos admitindo células com a mesma capacidade, isto é, número de canais na célula 1 igual a número de canais na célula 2, então  $N_1 = N_2 = N$ . A seguir serão definidos os três parâmetros mencionados anteriormente:

**-Tráfego:** Como já foi visto no desenvolvimento deste trabalho, um certo número de estações móveis em um sistema de telefonia móvel celular pode ter boa comunicação com mais de uma estação rádio base (RBS).

Assim sendo, podemos dizer que em um sistema com duas células contíguas podem existir três tipos de tráfego diferentes: tráfego que tem boa comunicação unicamente com a célula 1 ( $A_1$ ), tráfego que tem boa comunicação unicamente com a célula 2 ( $A_2$ ), e o tráfego que tem boa comunicação com ambas as células ( $A_{12}$ ).

O tráfego do sistema será então escrito em termos de um tráfego global "A" definido por três variáveis; Assim:

$$A = A_1 + A_2 + A_{12} \quad (1)$$

**Flexibilidade:** o parâmetro flexibilidade ( $\gamma$ ) nos fornece, a parcela do tráfego com acesso a ambas as células, e é definido da seguinte maneira

$$\gamma = \frac{A_{12}}{A} \quad (2)$$

obviamente  $0 \leq \gamma \leq 1$ . Se  $\gamma = 0$  significa que não existe tráfego flexível, e as células são consideradas isoladas uma da outra; se  $\gamma = 1$  todo o tráfego é considerado flexível, e ambas as células são consideradas como uma única.

**Desbalanceamento:** este parâmetro indica a diferença relativa de carga existente entre as células, e é definido como:

$$\beta = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \quad (3)$$

com  $-1 \leq \beta \leq 1$ .

A explicação que se segue é trivial, mas interessante para tomarmos familiaridade com  $\beta$ :

$\beta = 1$  implica todo o tráfego sendo oferecido à célula 1 (desbalanceamento completo)

$\beta = 0$  implica ambas as células recebendo a mesma quantidade de tráfego (sistema balanceado)

$\beta = -1$  implica todo o tráfego sendo oferecido à célula 2 (desbalanceamento completo)

Em termos de efeitos globais (sistêmicos)  $\beta = 1$  equivale a  $\beta = -1$  e a análise poderá ser feita apenas na faixa  $0 \leq \beta \leq 1$  ou  $-1 \leq \beta \leq 0$ .

Definidos estes três parâmetros ( $A, \gamma, \beta$ ) podemos escrever os três fluxos de tráfego do nosso modelo da seguinte forma:

$$A_1 = \frac{A(1-\gamma)(1+\beta)}{2} \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{A(1-\gamma)(1-\beta)}{2} \quad (5)$$

$$A_{12} = \gamma \cdot A \quad (6)$$

### V.3-Probabilidades de Transição

O diagrama de estados da nossa proposta é bidimensional, pelo fato de ser aplicado a um sistema de duas células. Devido a isto, definiremos duas taxas de ocupação:  $\lambda_{1,j}$  e  $\lambda_{2,j}$ , e duas taxas de serviço,  $\mu_{1,j}$  e  $\mu_{2,j}$  para a célula 1 e célula 2 respectivamente, com que o sistema chega ou deixa o estado  $(i,j)$ .

A taxa de desocupação de qualquer uma das células é proporcional ao número de canais ocupados se assumirmos que o

tempo de retenção tem distribuição exponencial negativo. Porém esta taxa será normalizada para ser igual ao número de canais ocupados, isto é, o tempo médio de retenção é assumido; assim, para todo  $i, j$

$$\mu_{1_{ij}} = j \quad (7)$$

$$\mu_{2_{ij}} = i \quad (8)$$

No caso das taxas de ocupação, estas assumirão diferentes valores, que dependem basicamente da estratégia de roteamento alternativo utilizada, o que, implicitamente indica uma dependência dos parâmetros, (i) tráfego, (ii) flexibilidade, e (iii) desbalanceamento.

Na ausência de roteamento alternativo ( $\gamma = 0$ ), ou seja, quando o sistema não reconhece o tráfego alternativo.

$$\lambda_{1_{ij}} = A1 = 0.5A(1+\beta), \quad (9)$$

$$\lambda_{2_{ij}} = A2 = 0.5A(1-\beta) \quad (10)$$

#### V.4-Estratégia de Encaminhamento e Alternativas

Define-se para cada estado  $(i, j)$  um parâmetro  $\alpha_{ij}$  de forma que

$$\lambda_{1_{ij}} = A1 + 0.5A12(1+\alpha_{ij}) = 0.5A[1+\beta+\gamma(\alpha_{ij}-\beta)] \quad (13)$$

$$\lambda_{2_{ij}} = A2 + 0.5A12(1-\alpha_{ij}) = 0.5A[1-\beta-\gamma(\alpha_{ij}-\beta)] \quad (14)$$

Assim, para qualquer alternativa temos o seguinte arranjo de coeficientes de encaminhamento.

O parâmetro  $\alpha_{ij}$  define para cada estado  $(i, j)$  a proporção de tráfego flexível que será direcionado para célula 1 ou célula 2; este parâmetro é, na realidade, o que define o procedimento da

estratégia de encaminhamento alternativo.

$$\begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{01} & \dots & \alpha_{0N} \\ \alpha_{10} & \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{N0} & \alpha_{N1} & \dots & \alpha_{NN} \end{bmatrix}$$

Nesta secção vamos definir os coeficientes  $\alpha_{ij}$  para a estratégia em geral e em particular para as três alternativas propostas.

De uma maneira geral podemos dizer que, dado um limiar de bloqueio  $L$ , se o estado  $(i,j)$  do sistema é tal que

- 1) o número de canais ocupados em cada célula é menor do que o limiar  $L$ , tudo se passa como se o sistema não reconhecesse o tráfego flexível como disponível para encaminhamento alternativo.
- 2) o número de canais ocupados em cada célula for maior ou igual ao limiar  $L$ , então o tráfego flexível é direcionado para a célula com menor número de canais ocupados.

No caso 2) pode ocorrer em que ambas as células apresentem o mesmo número de canais ocupados; assim sendo consideramos três alternativas como descrito no capítulo II. Estas alternativas são:

- Alternativa 1: mantem o desbalanceamento existente entre as células
- Alternativa 2: divide o tráfego alternativo equitativamente entre as duas células
- Alternativa 3: envia o tráfego alternativo para a célula menos sobre carregada.

Vamos então detalhar  $\alpha_{ij}$  para cada caso. Sejam  $i$  o número de canais ocupados da célula 2, e  $j$  os da célula 1. Então, se

-  $i$  e  $j < L \Rightarrow \gamma = 0$ , ou seja, o sistema não reconhece o tráfego alternativo então

$$\lambda_{1_{ij}} = \frac{A(1+\beta)}{2} \quad (15)$$

e

$$\lambda_{2_{ij}} = \frac{A(1-\beta)}{2} \quad (16)$$

Assim

$$\alpha_{ij} = \beta \quad (17)$$

Para qualquer outra relação entre  $i$  e  $j$  que não a expressa acima então  $\alpha_{ij} = E$ , onde  $E$  é uma função da combinação estratégia versus alternativa, a ser definido mais adiante.

Os coeficientes  $\alpha_{ij}$  podem ser escritos em termos de uma função lógica de três estados, função esta definida no trabalho "Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries" por Yacoub [4] e utilizada aqui. Sejam  $i$  e  $j$  as seguintes funções (de três estados):

$$i = \text{sgn}(i-L) \quad (18)$$

$$j = \text{sgn}(j-L) \quad (19)$$

$$\text{onde } \text{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

é a função sinal.

Definem-se para qualquer variável  $x$  de três estados, os indicadores  $x_{-1}$ ,  $x_0$  e,  $x_1$  tais que:

$$x_{-1} = \frac{-x(1-x)}{2} \quad (20)$$

$$x_0 = 1 - |x| \quad (21)$$

$$x_1 = \frac{x(1+x)}{2} \quad (22)$$

que assumem o valor "1" somente quando  $x = -1$ , "0" e "1" respectivamente, e zero para quaisquer outros valores de  $x$ . Assim as condições de  $i$ ,  $j$  e  $L$  acima descritas podem ser colocadas em forma de uma tabela verdade com entradas  $i$ ,  $j$  e saída  $\alpha_{ij}$ :

ENTRADAS		SAIDA
i	j	$\alpha_{ij}$
-1	-1	$\beta$
-1	0	E
-1	1	E
0	-1	E
0	0	E
0	1	E
1	-1	E
1	0	E
1	1	E

TABELA VERDADE

Assim

$$\alpha_{ij} = \beta i_{-1} j_{-1} + E(i_{-1} j_0 + i_{-1} j_1 + i_0 j_{-1} + i_0 j_0 + i_1 j_0 + i_0 j_1 + i_1 j_{-1} + i_1 j_1) \quad (23)$$

Resta-nos ainda determinar a função E. Para todas as estratégias, é válido dizer, que, o tráfego flexível será direcionado para a célula com menor número de canais ocupados, ou seja,  $E_{parcial} = -\text{sgn}(j-1)$ . As estratégias diferem entre si quando ambas

as células apresentam o mesmo número de canais. Mais uma vez utilizando-se da lógica de três estados é simples mostrar que para:

-Alternativa 1:  $E = -\text{sgn}(j-i) + \beta[1 - |\text{sgn}(j-i)|]$  (24)

-Alternativa 2:  $E = -\text{sgn}(j-i)$  (25)

-Alternativa 3:  $E = -\text{sgn}(j-i) - \text{sgn}(\beta)[1 - |\text{sgn}(j-i)|]$  (26)

Veja que para  $i \neq j$  as três expressões convergem para  $E = -\text{sgn}(j-i)$ .

Para  $i = j$  nos casos em que a condição  $i$  e  $j < L$  não é satisfeita, então,  $\alpha_{ij} = E$  para

-Alternativa 1:  $E = \beta$

-Alternativa 2:  $E = 0$

-Alternativa 3:  $E = -\text{sgn}(\beta)$

como desejamos.

Na Fig-1, mostrada a seguir, podem ser observados os valores de  $\alpha_{ij}$  limiar  $L = 2$ , número de canais  $N = 6$ , e alternativa  $\text{Alt} = 2$ .

As figuras 2, 3 e 4 mostram um exemplo do diagrama de estados que se obtém para cada alternativa utilizada, onde se considera  $N = 5$  e  $L = 2$ .

00	01	02	03	04	05	06	07
BETA	BETA	BETA	-1	-1	-1	-1	-1
10	11	12	13	14	15	16	17
BETA	BETA	BETA	-1	-1	-1	-1	-1
20	21	22	23	24	25	26	27
BETA	BETA	BETA	-1	-1	-1	-1	-1
30	31	32	33	34	35	36	37
1	1	1	E	-1	-1	-1	-1
40	41	42	43	44	45	46	47
1	1	1	1	E	-1	-1	-1
50	51	52	53	54	55	56	57
1	1	1	1	1	E	-1	-1
60	61	62	63	64	65	66	67
1	1	1	1	1	1	E	-1
70	71	72	73	74	75	76	77
1	1	1	1	1	1	1	E

Fig-1 Valores de Alfa para  
L=2 N=6 e Alt=2

Para ilustrar o funcionamento da técnica utilizada em função dos diagramas de estados mostrados (Fig-1, 2, e 3) vamos tomar 3 exemplos diferentes:

- (i) Estado  $(0, 1)$  que significa um canal ocupado na célula 1 e 0 canal ocupado na célula 2. Como o limiar definido é 2, ainda não se aplica o encaminhamento alternativo e as duas células ocupam seus canais com todo o tráfego originado nelas ( $\lambda_{e_1}$  e  $\lambda_{e_2}$ ).
- (ii) Estado  $(1, 3)$ ; neste caso se aplica o encaminhamento alternativo (limiar menor que o número de canais ocupados na célula 1). A partir daqui a célula 1 ocupará o resto dos seus canais livres unicamente com seu tráfego fixo (A1), e a célula 2 pelo fato de ter menos canais ocupados escoará seu tráfego fixo (A2) mais todo o tráfego alternativo de ambas as

células (A12). Isto acontece para todos os casos similares a este ou seja o sistema sempre encaminha o tráfego alternativo para a célula com menor número de canais ocupados (a partir do limiar de bloqueio definido).

(iii) Estado (3, 3); ambas as células tem o mesmo número de canais ocupados. É neste estado (e em todos os outros em que  $i=j$ ) que as alternativas (1, 2, 3) se diferem. Para o caso da alternativa 2 (Fig-3), a célula 1 escoará seu próprio tráfego fixo (A1) mais a metade do tráfego alternativo ( $0,5A12$ ) e a célula 2 seu próprio tráfego fixo (A2) mais a outra metade do alternativo ( $0,5A12$ ).

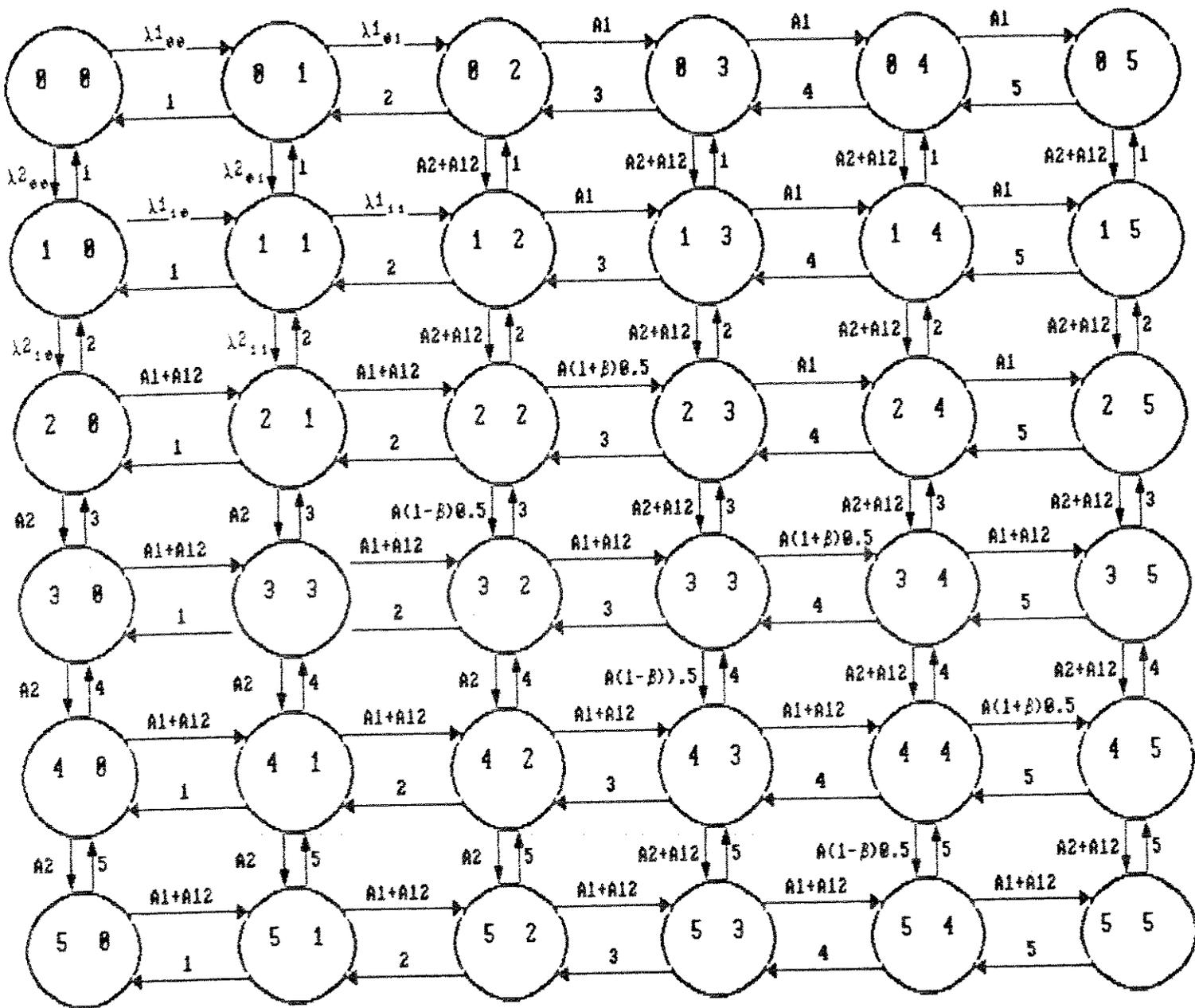


FIG-2 DIAGRAMA DE ESTADOS  
 $N=5$   $L=2$   $A1=1$

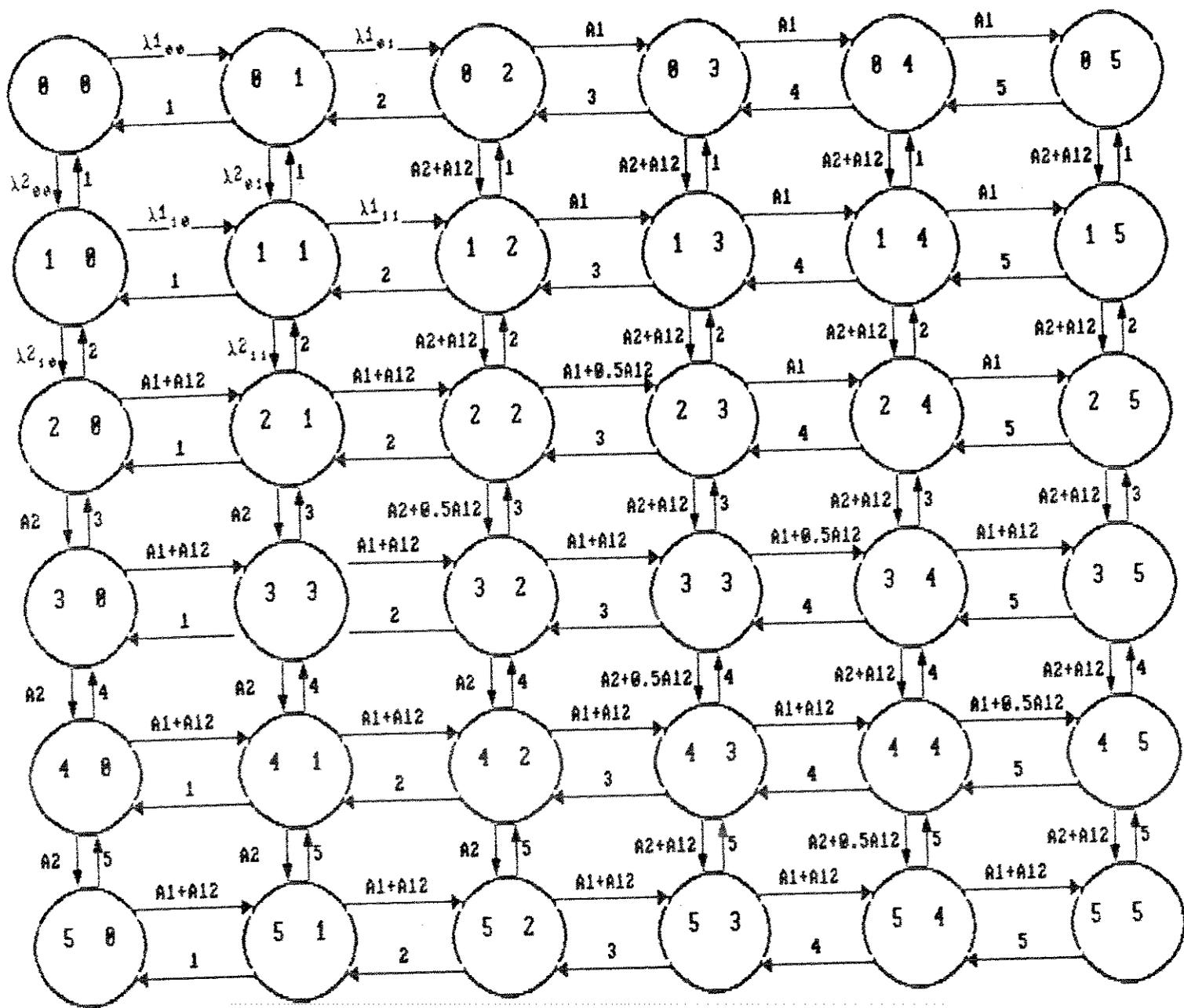


FIG-3 DIAGRAMA DE ESTADOS  
 $N=5$   $L=2$   $ALT=2$

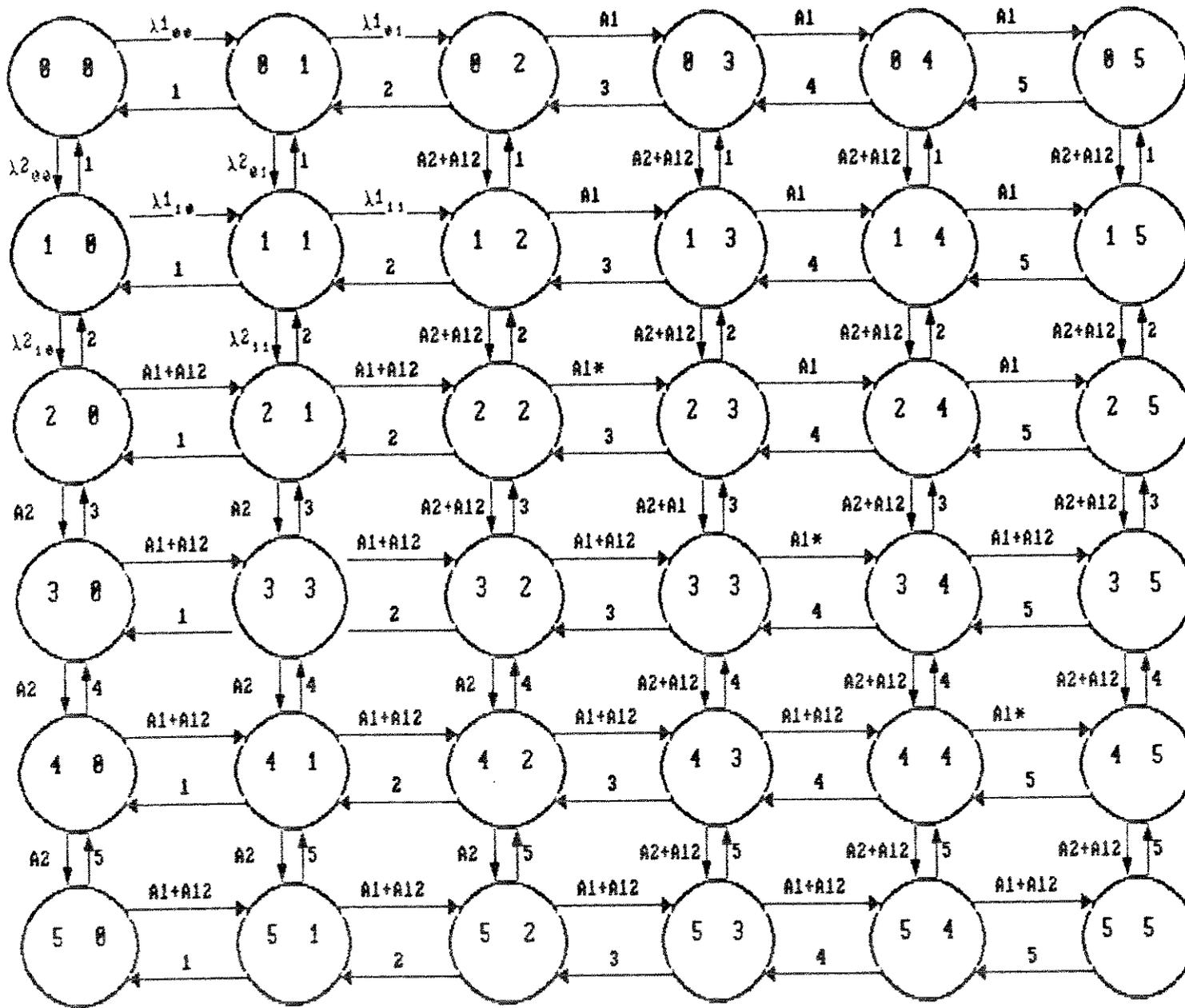


FIG-4 DIAGRAMA DE ESTADOS  
 $N=5$   $L=2$   $ALT=3$   
 (\*, célula mais carregada)

#### V.5-Medidas de Desempenho

Como já foi dito previamente, o desempenho do sistema será avaliado através das probabilidades de bloqueio. Em um sistema com duas células e dependência mútua de tráfego, podem ocorrer três tipos de tráfego, e em decorrência disto três probabilidades de

bloqueio diferentes:

- T1: Tráfego bloqueado quando a célula 1 está bloqueada
- T2: Tráfego bloqueado quando a célula 2 está bloqueada
- T12: Tráfego bloqueado se ambas as células estão bloqueadas.

No nosso modelo  $A1=T1$ ,  $A2=T2$ , e  $A12=T12$ ; definiremos  $B1$ ,  $B2$  e  $B12$  como sendo a probabilidade de bloqueio encontrada por  $T1$ ,  $T2$ , e  $T12$  respectivamente tais que

$$B1 = \sum_{i=0}^N P_{iN} \quad (27a)$$

$$B2 = \sum_{j=0}^N P_{Nj} \quad (27b)$$

$$B12 = B1 \cap B2 = P_{NN} \quad (27c)$$

Onde  $P_{ij}$  é a probabilidade do estado  $(i,j)$ . Obviamente que  $B12 \leq B1$ , e  $B12 \leq B2$ , enquanto que a relação entre  $B1$  e  $B2$  dependerá do sinal do parâmetro de desbalanceamento ( $\beta$ );  $B1$  será igual a  $B2$  no caso do sistema estar balanceado.

Para o caso em que o limiar  $L = N+1$ , ou no caso em que  $\gamma = 0$  as células são consideradas isoladas uma da outra, não existindo  $T12$ ; e tanto  $B1$  como  $B2$  podem ser calculados pela fórmula Erlang-B

$$B1 = \sum_{i=0}^N P_{iN} = E(A1, N) \quad (28a)$$

$$B2 = \sum_{j=0}^N P_{Nj} = E(A2, N) \quad (28b)$$

Da mesma forma se  $\gamma = 1$  a fórmula Erlang-B também se aplica e o bloqueio do sistema será  $E(A, 2N)$ , pois as duas células são consideradas como uma só.

A principal medida de desempenho do sistema será dada pela probabilidade de bloqueio médio ( $B_m$ ) sobre os três tipos de tráfego.

$$B_m = \frac{T_1 \cdot B_1 + T_2 \cdot B_2 + T_{12} \cdot B_{12}}{A} \quad (29)$$

#### V.6- Método Computacional

O objetivo desta seção é descrever cada parte do programa implementado para nosso modelo. Como foi mostrado no capítulo IV, o número de estados para um sistema de duas células é uma função quadrática como o número de canais nas células. A solução analítica para um caso geral é impraticável, porém pode ser aplicável em casos particulares onde a redução do número de estados simplifica o problema. Assim, os resultados dados neste trabalho se baseiam em análises numéricas obtidas com o uso de computador.

Com o objetivo de analisar o nosso caso particular, foi implementado um programa em linguagem Pascal. Este programa gera uma saída que estima o desempenho da nossa proposta em termos de bloqueio médio.

Os dados de entrada e os dados produzidos na saída são os seguintes:

Dados de Entrada:

- Número de canais em cada célula
- Tráfego total oferecido às células
- Proporção de tráfego flexível
- Desbalanceamento de tráfego entre as células

## Dados de Saída:

- Dados de entrada
- Fluxos de tráfego
- Medidas de desempenho

## V.7-Estrutura do algoritmo

Nesta seção serão apresentadas as partes que compõem o programa, que é composto por sub-rotinas (procedimentos) as quais podem ser testadas separadamente. Na fig-7 estão representados os blocos e a sua sequência de interação; cada bloco será definido brevemente.

- **Dados de Entrada:** este bloco implementa a interação com o usuário, onde são fornecidos os parâmetros de entrada que estão relacionados a seguir:

- a.) Número de canais por célula (N)
- b.) Total de tráfego oferecido ao sistema (A)
- c.) Proporção de tráfego flexível ( $\gamma$ )
- d.) Desbalanceamento entre as células ( $\beta$ )
- e.) Limiar de bloqueio a ser analisado (L)
- f.) Alternativa escolhida (Alt)

- **Fluxos de Tráfego:** dado o tráfego oferecido ao sistema, este bloco faz a distribuição em A1, A2, e A12 calculados em termos dos parâmetros A,  $\beta$  e  $\gamma$  fornecidos no bloco anterior, e utilizando as seguintes fórmulas:

$$A1 = 0.5A(1-\gamma)(1+\beta)$$

$$A2 = 0.5A(1-\gamma)(1-\beta)$$

$$A12 = \gamma.A$$

- **Alternativas:** esta sub-rotina é dividida em outras três, representando as três alternativas propostas para quando o

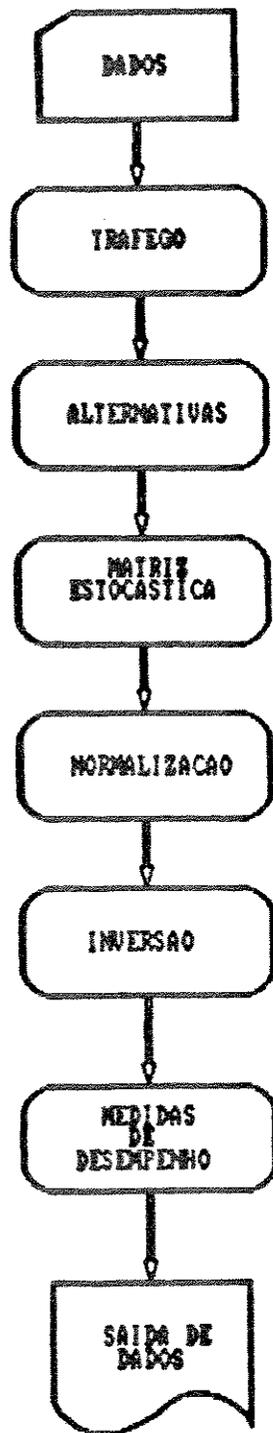


Fig-5 Estrutura do Programa

número de canais ocupados em cada célula é igual. Cada uma das três fornece a densidade de probabilidade de transição para cada estado, através das equações (7), (8), (13) e (14).

**Matriz estocástica:** a partir do diagrama de estados determinado no capítulo IV, as equações de balanceamento são determinadas e os coeficientes postos em forma matricial.

- **Normalização:** Este bloco elimina a indeterminação das equações de equilíbrio por substituição de uma das equações por:

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P_{ij} = 1 \quad (30)$$

ou seja, substituir uma das linhas da matriz estocástica por um vetor de "ums", adotamos substituir a última linha, porém poderia ser qualquer uma delas.

- **Inversão da Matriz:** este bloco faz a inversão da matriz estocástica modificada ( $M'$ ) da fórmula dada em [10]. Para esta tarefa foi utilizado o método de inversão "Jordan's Method", inicialmente escrito em Fortran e modificado, para uso no nosso modelo, para a linguagem Pascal.
- **Medidas de desempenho:** As probabilidades de bloqueio  $B_1$ ,  $B_2$ , e  $B_{12}$  são calculadas como nas equações [27a], [27b] e [29].
- **Dados de Saída:** os dados de saída são:

- Os valores dos dados de entrada
- Os tráfegos calculados ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_{12}$ )
- As medidas de desempenho ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_{12}$ , e  $B_m$ )

Os quadros a seguir ilustram um exemplo do que se obtém ao se rodar o programa, tanto no início, quando o programa solicita os dados de entrada (quadro 1), como na saída depois do processamento (quadro 2).

Número de canais na célula 1?	:3
Número de canais na célula 2?	:3
Tráfego total?	:3
Flexibilidade? (0 - 1)	:0.2
Desbalanceamento? (-1 - 1)	:0.3
Limiar?	:2
Alternativa?	:2
(ALT1-Mantém o desbalanceamento)	
(ALT2-Divide o tráfego)	
(ALT3-Balance do sistema)	

Quadro 1

DADOS DE ENTRADA	DADOS DE SAÍDA
N1 = 3	
N2 = 3	
T = 3	
T1 = 1.56	
T2 = 0.84	BLOC1 = 0.184419
T12 = 0.60	BLOC2 = 0.083387
Gama = 0.2	BLOC12 = 0.021978
Beta = 0.3	BLOC-MÉDIO = 0.123526
LIM = 2	
ALT = 2	

Quadro 2

oooooooooooooooooooo

## C\_A\_P\_í\_T\_U\_L\_O\_ \_VI

### SOLUÇÕES ANALÍTICAS

Como já foi mencionado no desenvolvimento deste trabalho, o nosso objetivo é avaliar o desempenho de um sistema de telefonia móvel, variando o limiar de bloqueio e utilizando para isto, valores práticos de: (i) capacidade (ii) flexibilidade e (iii) desbalanceamento.

O desempenho do sistema será avaliado pela probabilidade média de bloqueio, obtida pela média ponderada das probabilidades de bloqueio individuais de cada uma das células e da região de intersecção das mesmas; estas, por sua vez, são obtidas da soma apropriada das probabilidades de equilíbrio de estados na cadeia de Markov, neste caso, um processo de nascimento e morte bidimensional.

Dada a complexidade das equações de estado obtidas aliada ao grande número das mesmas, uma solução analítica de forma fechada para o caso geral é, de fato, impraticável. Um sistema de 2 células, com N canais cada, implica a solução de um conjunto de  $(N+1)^2$  equações com o mesmo número de incógnitas; por exemplo, se  $N=10$  (canais) teríamos 121 equações a serem resolvidas. No entanto, é possível obterem-se soluções analíticas para alguns casos especiais em que, por exemplo, nem todos os parâmetros são levados em consideração simultaneamente, ou então a faixa de variação dos mesmos é limitada a valores específicos. Neste sentido estaremos considerando os seguintes casos especiais:

- (i) Bloqueio médio para valores limites ( $\gamma=0$  e  $\gamma=1$ ) de flexibilidade
- (ii) Bloqueio médio para limiar de bloqueio  $L=N+1$

(iii) Bloqueio médio para baixo tráfego.

As soluções analíticas para os casos especiais, nos possibilitam ter uma visão geral dos fenômenos do sistema, o que, proporciona uma otimização na análise da solução global, dada através de métodos computacionais; além disso elas permitem que os métodos computacionais sejam validados através da comparação dos resultados em ambos os casos.

VI.1-Bloqueio Médio para Valores Limites de Flexibilidade e Limiar de Bloqueio

No que concerne à proporção de tráfego flexível, os limites ocorrem para  $\gamma=0$  ou  $\gamma=1$ . No primeiro caso,  $\gamma=0$ , não existe tráfego flexível, ( $A_{12}=0$ ), isto é, não existe dependência mútua de tráfego, o que significa que as células são isoladas uma da outra. Assim, cada célula pode ser analisada independentemente e o bloqueio de cada uma delas, obviamente, pode ser calculado através da fórmula Erlang-B. Então:

$$B_1 = E(A_1, N) \quad (1a)$$

$$B_2 = E(A_2, N) \quad (1b)$$

$$B_{12} = 0 \quad (1c)$$

e

$$B_m = \frac{A_1 E(A_1, N) + A_2 E(A_2, N)}{A_1 + A_2} \quad (1d)$$

onde

$$A_1 = \frac{A(1+\beta)}{2}$$

$$A_2 = \frac{A(1-\beta)}{2}$$

e

$$A_{12} = 0$$

No caso de não existir desbalanceamento entre as células, ou seja

$\beta = 0$  então:

$$A_1 = \frac{A}{2}$$

e

$$A_2 = \frac{A}{2}$$

e o bloqueio médio passa a ser

$$B_m = E\left(\frac{A}{2}, N\right) \quad (2)$$

Ao contrário do caso anterior, se tivéssemos  $\gamma = 1$ , todo o tráfego é considerado flexível ( $A_1=A_2=0$  e  $A_{12}=A$ ), o que significa que as duas células se fundem numa única célula com tráfego total  $A$  e  $2N$  canais. Aqui também a fórmula Erlang-B se aplica e:

$$B_1 = B_2 = 0$$

$$B_m = B_{12} = E(A, 2N)$$

Note que neste caso o bloqueio médio não depende do desbalanceamento  $\beta$ .

Finalmente, para o caso em que o limiar de bloqueio  $L = N+1$ , vemos que o processo de desvio de tráfego flexível para uma ou outra célula só se dará após estas já terem alcançado seus respectivos estados de bloqueio, ou seja, o tráfego flexível jamais será redirecionado para a outra célula como estabelece o algoritmo. Assim, mais uma vez, as células podem ser consideradas independentes entre si, quando então é possível utilizar a fórmula Erlang-B como em (1a, 1b, 1c, 1d).

## VI.2-Bloqueio Médio em Função do Desbalanceamento

Quando não existe flexibilidade ( $\gamma = 0$ ), ou seja, quando o sistema não utiliza encaminhamento alternativo, as células são

completamente isoladas uma da outra; então, como já foi dito, a probabilidade de bloqueio médio pode ser calculada aplicando diretamente:

$$B_1 = E(A_1, N) \quad (3)$$

$$B_2 = E(A_2, N) \quad (4)$$

Escrevendo o bloqueio como função de  $A$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$  temos:

$$B_m(A, \beta, \gamma) = \frac{(1+\beta)}{2} E\left[\frac{(1+\beta)A}{2}, N\right] + \frac{(1-\beta)}{2} E\left[\frac{(1-\beta)A}{2}, N\right] \quad (5)$$

Vamos agora desenvolver (5), de forma a obter uma fórmula aproximada de  $B_m$  para  $\gamma=0$ . Sejam (i)  $f(x)$  uma função arbitrária expandível em série de potências, e (ii)  $g(x, \beta)$  tal que:

$$g(x, \beta) = \frac{(1+\beta)}{2} f(x + \beta x) + \frac{(1-\beta)}{2} f(x - \beta x) \quad (6)$$

Definindo-se

$$f(x) = \sum_k a_k x^k \quad e$$

$$g(x) = x^n f(x) = \sum_k a_k x^{k+n}$$

com  $k$ , e  $n \geq 0$

Então, diferenciando ambos os termos

$$g^{(r)}(x) = \sum_k a_k (k+n)^{(r)} x^{k+n-r} = r! \sum_k a_k \binom{k+n}{r} x^{k+n-r} \quad (7)$$

Mas

$$\sum_k a_k \binom{k+n}{r} x^k = \frac{x^{r-n}}{r!} g^{(r)}(x) \quad (8)$$

Para  $n = 1$

$$\sum_k a_k \binom{k+1}{r} x^k = \frac{x^{r-1}}{r!} g^{(r)}(x) \quad (9)$$

que pode ser usado para avaliar

$$g(x, \beta) = \frac{(1+\beta)}{2} f(x + \beta x) + \frac{(1-\beta)}{2} f(x - \beta x)$$

Então

$$g(x, \beta) = 0.5 \sum_k a_k x^k [(1+\beta)^{k+1} + (1-\beta)^{k+1}] \quad (10)$$

$$g(x, \beta) = \sum_k a_k x^k \sum_j \beta^{2j} \binom{k+1}{2j} \quad (11)$$

$$g(x, \beta) = \sum_j \beta^{2j} \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{2j} \quad (12)$$

Assim

$$g(x, \beta) = \sum_j \beta^{2j} \frac{x^{2j-1}}{(2j)!} g^{(2j)}(x)$$

Onde

$$g(x) = x f(x)$$

Então fica mostrado que:

$$g(x, \beta) = \sum_{j=0}^{\infty} \beta^{2j} \frac{x^{2j-1}}{(2j)!} \left(\frac{d}{dx}\right)^{2j} [x f(x)] \quad (13)$$

Como exemplo, considere  $f(x)$  como sendo a probabilidade de bloqueio dado um tráfego igual a  $x$  e um número de canais  $N=1$ , então:

$$f(x) = E(x, 1) = \frac{x}{1+x}$$

Assim

$$g(x, \beta) = \frac{x}{1+x} + \beta^2 \frac{x}{(1+x)^3} + O(x^3 \beta^4) \quad (14)$$

Para grandes valores de  $N$ , a expressão exata é muito complexa porém, uma boa aproximação baseada em:

$$f(x) = \frac{1}{N!} x^N e^{-x} \cong E(x, N)$$

É dada por

$$g(x, \beta) = f(x) \left\{ 1 + \beta^2 \left[ \frac{N(N+1)}{2} - (N-1)x + \frac{x^2}{2} \right] \right\} + O(\beta^4) \quad (15)$$

Desprezando-se os termos de maior ordem  $O(\beta^4)$ , o que vemos em (15) é que o bloqueio médio é uma função quadrática de  $\beta$ .

Assim, para  $\gamma=0$  o bloqueio médio varia em relação a  $\beta$  da seguinte maneira:

$$B_m \cong E(A/2, N) \left\{ 1 + \beta^2 \left[ \frac{N(N+1)}{2} - (N+1)x + \frac{x^2}{2} \right] \right\} \quad (16)$$

ou

$$B_m \cong E(A/2, N) [1 + K\beta^2] \quad (17)$$

onde

$$K = \frac{N(N+1)}{2} - (N+1)\frac{A}{2} + (A/2)^2/2 \quad (18)$$

ou seja, o bloqueio médio é uma função quadrática em  $\beta$ .

### VI.3-Bloqueio Médio versus Flexibilidade

Vamos agora conjeturar a respeito do comportamento do bloqueio médio ( $B_m$ ), em função do parâmetro flexibilidade ( $\gamma$ ). Como foi dito anteriormente, uma solução analítica para o caso geral é inviável; assim, consideremos os dois casos extremos,  $\gamma=0$  e  $\gamma=1$ . No caso  $\gamma=0$  vimos que o bloqueio médio é uma função quadrática em  $\beta$ , ou seja:

$$B_m(A, \beta, 0) \cong E(A/2, N)(1 + K\beta^2) \quad (19)$$

Note que para  $\beta=0$ , a fórmula obtida é de fato exata, ou:

$$B_m(A, 0, 0) = E(A/2, N)$$

Para  $\gamma=1$  vimos que:

$$B_m(A, \beta, 1) = E(A, 2N) \quad (20)$$

Que independe de  $\beta$ .

É fácil verificar que  $B_m(a, \beta, 1) < B_m(A, \beta, 0)$ , para  $A \neq 0$ .

Com o aumento do parâmetro flexibilidade espera-se que a probabilidade média de bloqueio diminua, uma vez que, mais tráfego flexível poderá ser utilizado para encaminhamento alternativo.

Conjetura-se, portanto, que  $B_m$  é uma função monotônica decrescente em  $\gamma$  cujo máximo é obtido para  $\gamma=0$ , e mínimo para  $\gamma=1$ .

#### VI.4-Aproximação para Baixo Tráfego

Para um sistema com baixo tráfego os estados de bloqueio mais significativos são  $(0, N)$  para a célula 1, e  $(N, 0)$  para a célula 2. O diagrama de estados correspondente para tal situação é mostrado na Fig-1.

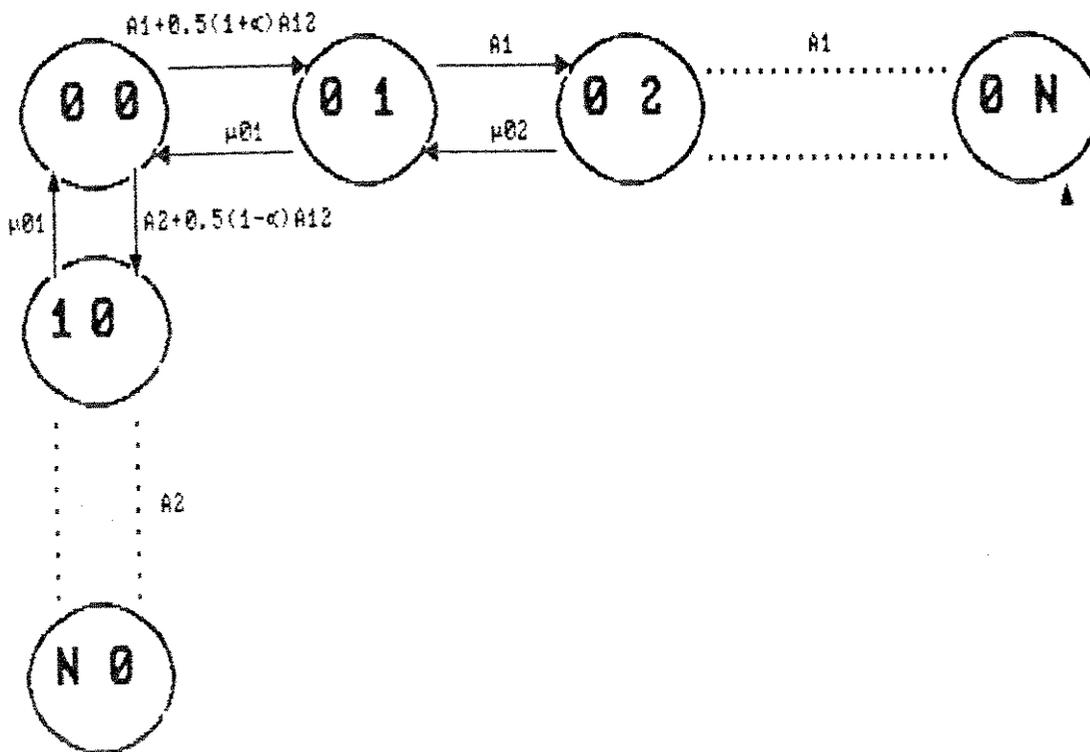


Fig-1 Diagrama de Estados para Estados Intermediários

Note-se que, nesta condição, a cadeia de Markov se resume a um processo de nascimento e morte unidimensional, cuja solução é trivial.

Assim o bloqueio médio é dado por :

$$B_m = \frac{A_1 P_{0N} + A_2 P_{N0}}{A}$$

Onde

$$A_1 = \frac{A}{2} (1+\beta)(1-\gamma) \quad \text{e} \quad A_2 = \frac{A}{2} (1-\beta)(1-\gamma)$$

e  $P_{0N}$  e  $P_{N0}$  são as probabilidades dos estados  $(0, N)$  e  $(N, 0)$  respectivamente.

Desta forma

$$B_m = \left\{ \left[ \frac{(1+\beta)}{2} A \right]^L A_1^{N-L} A_1 + \left[ \frac{(1-\beta)}{2} A \right]^L A_2^{N-L} A_2 \right\} \frac{P_{00}}{A N!} \quad (21)$$

$$B_m = \left\{ \left[ \frac{(1+\beta)}{2} A \right]^L A_1^{N-L+1} + \left[ \frac{(1-\beta)}{2} A \right]^L A_2^{N-L+1} \right\} \frac{P_{00}}{A N!} \quad (22)$$

$$B_m = \left\{ \left[ \frac{(1+\beta)}{2} A \right]^L \left[ \frac{(1+\beta)(1-\gamma)}{2} A \right]^{N-L+1} + \left[ \frac{(1-\beta)}{2} A \right]^L \left[ \frac{(1-\beta)(1-\gamma)}{2} A \right]^{N-L+1} \right\} \frac{P_{00}}{A N!}$$

$$B_m = \left\{ \left[ \frac{(1+\beta)}{2} A \right]^{N+1} (1-\gamma)^{N-L+1} + \left[ \frac{(1-\beta)}{2} A \right]^{N+1} (1-\gamma)^{N-L+1} \right\} \frac{1}{AN!} \quad (23)$$

$$B_m = \frac{[(1+\beta)^{N+1} + (1-\beta)^{N+1}]}{2} (A/2)^N (1-\gamma)^{N-L+1} \frac{P_{00}}{N} \quad (24a)$$

Onde  $P_{00}$  é a probabilidade do estado  $(0, 0)$

Vemos que

$$\frac{(1+\beta)^{N+1} + (1-\beta)^{N+1}}{2} = 1 + \beta^2 + O(\beta^4)$$

$$\text{Assim } B_m = \left[ P_{00} \left( \frac{A}{2} \right)^2 / N! \right] (1 + \beta^2) (1 - \gamma)^{N-L+1} \quad (24b)$$

ou seja,  $B_m$  é uma função quadrática de  $\beta$  ao desprezarmos os termos  $O(\beta^4)$ .

A função bloqueio médio portanto, decresce monotonicamente com o aumento de  $\gamma$ . É facilmente verificável que a função será tanto menor quanto menor for o limiar "L" para um dado número de canais N, tráfego A, desbalanceamento  $\beta$  e flexibilidade  $\gamma$ . Note-se que para  $L=N+1$  a função não depende de  $\gamma$ .

Note a semelhança entre as equações (19) e (24b) com as devidas aproximações. Assim, numa tentativa de se obter uma expressão aproximada para o bloqueio médio poderíamos combinar estas para obter a seguinte expressão:

$$B_m = E\left(\frac{A}{2}, N\right) (1 + K\beta^2) (1 - \gamma)^{N-L+1} \quad (26)$$

Para  $\gamma=0$  e/ou  $L=N+1$  o bloqueio médio reduz-se à expressão (19), no entanto, para  $\gamma=1$  o bloqueio médio vai a zero, o que não corresponde com a realidade. Espera-se que a expressão aproximada (26) dê bons resultados para  $\gamma$  pequeno e desvie do valor exato à medida que  $\gamma$  aumente.

O maior desvio obviamente ocorrerá para  $\gamma=1$ , em que a expressão aproximada dá um bloqueio médio nulo e o valor exato é  $E(A, 2N)$ .

A fim de contornar esta situação propõe-se a seguinte aproximação

$$B_m = E(A/2, N) (1 + K\beta^2) (1 - \gamma)^{N-L+1} + f(\gamma) E(A, 2N) \quad (27)$$

onde

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0 & \text{para } \gamma=0 \\ 1 & \text{para } \gamma=1 \end{cases}$$

Seja, por exemplo,  $f(\gamma) = \frac{N}{\sqrt{\gamma}}$  então:

$$B_m = E(A/2, N)(1+K\beta^2)(1-\gamma)^{N-1+1} + \frac{N}{\sqrt{\gamma}} E(A, 2N) \quad (28)$$

De fato a função  $f(\gamma)$  que multiplica  $E(A, 2N)$  provavelmente dependerá dos outros parâmetros ( $L, \beta$ , etc) mas de uma maneira não obviamente intuitiva. Por simplicidade adotamos  $f(\gamma) = \frac{N}{\sqrt{\gamma}}$  e a validade da equação acima deverá ser feita no próximo capítulo.

#### VI.5-Comparação Inicial entre as Alternativas

Como visto nos capítulos anteriores, as alternativas diferem entre si nos instantes em que ambas as células apresentam o mesmo número de canais ocupados, ou seja, nos estados  $(i, j)$  para  $j=i$ .

Vimos ainda que uma solução aproximada para a probabilidade média de bloqueio pode ser obtida através da análise para baixo tráfego. Podemos então utilizar a solução aproximada para uma comparação inicial entre as estratégias. Na solução de baixo tráfego, o único estado em que as células apresentam o mesmo número de canais ocupados é o estado  $(0, 0)$ , a partir do que, estaremos considerando as várias alternativas. O correspondente diagrama de estados que engloba o estado  $(0, 0)$ , é mostrado na Fig-2.

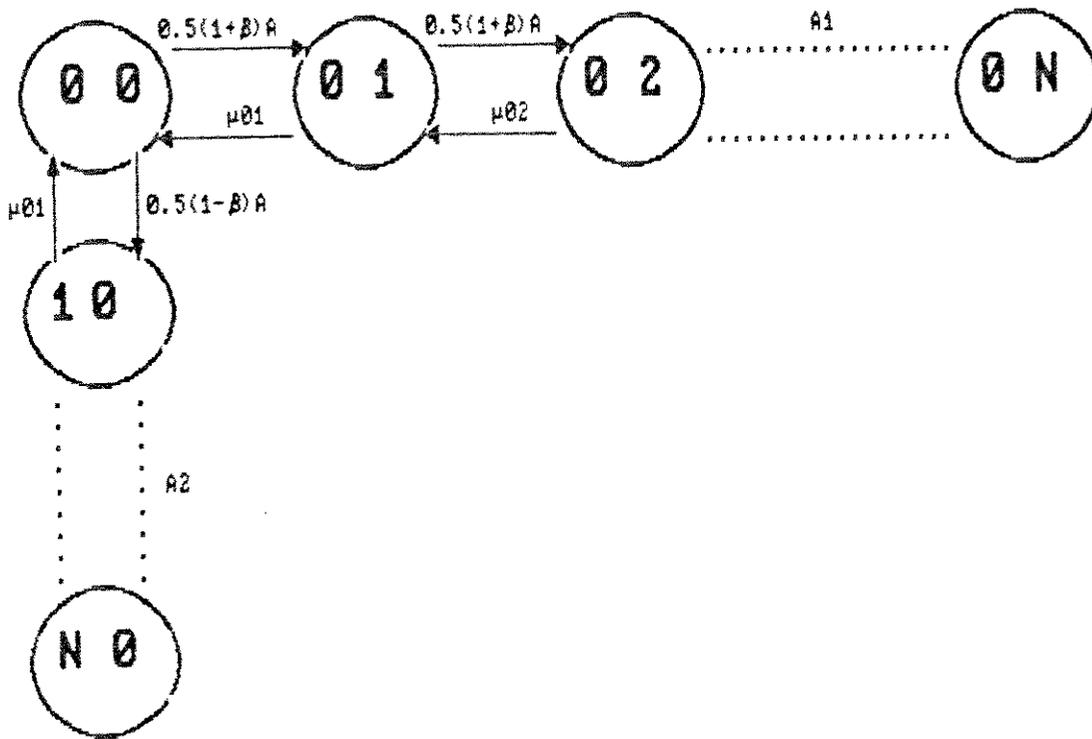


Fig-2 Diagrama de Estados para Aproximação de Baixo Tráfego

A probabilidade média de bloqueio é obtida da mesma forma que no item anterior e é dada por:

$$B_m = \left[ A_1^{N+1} + A_2^{N+1} + \frac{A_1 A_2}{2} (A_1^N + A_2^N) + \frac{\infty A_1 A_2}{2} (A_1^N - A_2^N) \right] \frac{P_{00}}{AN!} \quad (29)$$

Analisando-se a equação acima vê-se que para  $\beta=0$ , temos  $A_1=A_2$ , então o valor de  $\infty$  é irrelevante.

Para  $\beta>0$ , temos  $A_1>A_2$ , então  $B_m$  é mínimo para  $\infty$  mínimo, isto é,  $\infty=-1$ .

Para  $\beta<0$ , temos  $A_1<A_2$ , então  $B_m$  é mínimo para  $\infty$  máximo, isto é,  $\infty=1$ .

Conclui-se, portanto, que todas as alternativas são equivalentes para  $\beta=0$ , e que a melhor é a alternativa 3, cujo  $\alpha$  é implementado exatamente como mostrado acima ( $\alpha_j = E = -\text{sgn}(\beta)$  dado pela equação (26) do capítulo V).

Quando se mantém o desbalanceamento entre as células, ou seja,  $\text{Alt} = 1$ , então  $\alpha = \beta$ , daí:

$$B_{m1} = (A_1^{N+1} + A_2^{N+1} + \frac{A_{12}}{2} (A_1^N + A_2^N) + \frac{\beta A_{12}}{2} (A_1^N - A_2^N)) \frac{P_{00}}{AN!} \quad (30)$$

Quando se divide a carga de tráfego entre as células por igual, então  $\alpha = 0$  daí:

$$B_{m2} = (A_1^{N+1} + A_2^{N+1} + \frac{A_{12}}{2} (A_1^N + A_2^N)) \frac{P_{00}}{AN!} \quad (31)$$

Analisando-se as expressões (30) e (31) vê-se que:

$$B_{m1} \geq B_{m2} \quad \text{para todo } \beta$$

Assim de uma forma geral

$$B_{m1} \geq B_{m2} \geq B_{m3}$$

Onde  $B_{mx}$ , ( $x=1, 2, 3$ ) é a probabilidade de bloqueio dada pelas alternativas 1, 2, e 3 respectivamente.

## VI.6-Sumário

Neste capítulo tentou-se obter expressões analíticas para o bloqueio médio de um sistema de 2 células em que aplicou-se a técnica da variação de bloqueio. Uma fórmula fechada para o caso geral é impraticável, mas ao se considerar casos específicos várias simplificações podem ser adotadas.

Em particular para valores limites de flexibilidade ( $\gamma=0$  e

$\gamma=1$ ) e também para o caso em que o limiar de bloqueio é  $L=N+1$ , a fórmula Erlang-B se aplica.

Uma aproximação para o caso em que  $\gamma=0$  foi obtida de forma que o bloqueio médio foi encontrado como uma função quadrática em  $\beta$  (desbalanceamento).

Para valores intermediários dos parâmetros de tráfego, flexibilidade e desbalanceamento uma aproximação de baixo tráfego foi obtida, onde o diagrama bidimensional do processo de Markov se reduz a um unidimensional, onde se obtém uma solução canônica. Esta solução, aliada à obtida para o caso em que  $\gamma=0$ , gerou uma outra solução aproximada em que todos os parâmetros são envolvidos. A validade desta aproximação (para baixo tráfego) será testada no próximo capítulo.

Utilizando-se ainda a aproximação de baixo tráfego, uma comparação inicial entre as três alternativas, foi obtida, onde concluiu-se preliminarmente que a alternativa 3 mostra um desempenho melhor que a alternativa 2, e por sua vez, é melhor que a alternativa 1. Mais uma vez, a comparação definitiva será feita através dos dados fornecidos pela análise numérica implementada em computador.

oooooooooooooooooooo

## C A P Í T U L O VII

### RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo analisaremos o desempenho do sistema de rádio móvel celular, ao se aplicar a técnica Variação do Limiar de Bloqueio.

Os resultados a serem mostrados são (i) os correspondentes obtidos através do programa computacional, que implementa de maneira rigorosa a estratégia proposta, além dos (ii) relativos à aproximação analítica para baixo tráfego. A medida de desempenho é o bloqueio médio que será dado em função dos seguintes parâmetros:

- Proporção de tráfego oferecido ao sistema ( $A$ )
- Desbalanceamento entre células contíguas ( $\beta$ )
- Número de canais por célula ( $N$ )
- Limiar de bloqueio ( $L$ )
- Alternativas da estratégia (Alt 1, 2, 3).

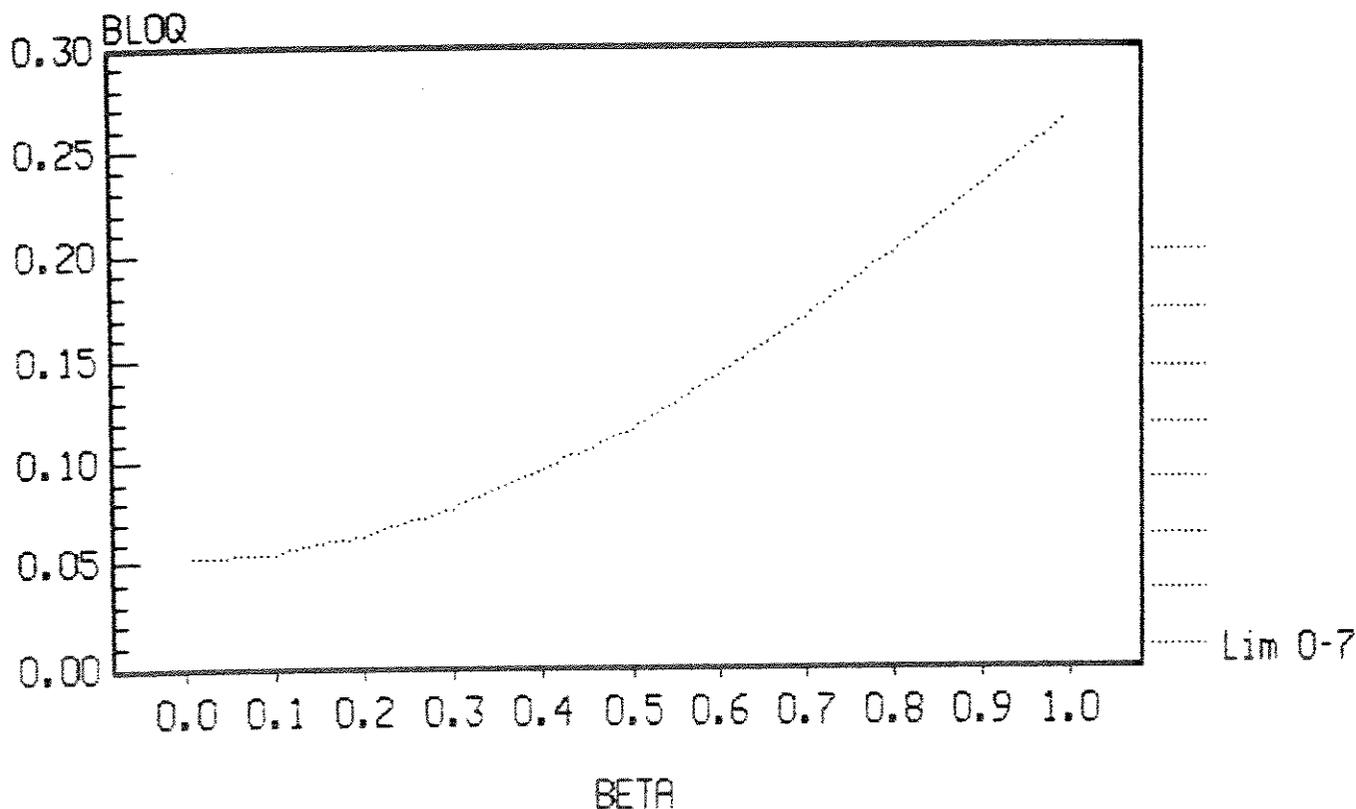
Os resultados apresentados neste capítulo, foram obtidos através da manipulação destes parâmetros, variando-os exaustivamente a fim de conhecer o comportamento de um determinado sistema, com as características que desejarmos em termos de, carga de tráfego, flexibilidade e desbalanceamento, além da variação do limiar de bloqueio que é a característica principal da técnica proposta.

#### VII.1-Bloqueio Médio versus Desbalanceamento

Seja a condição em que o tráfego flexível é nulo ( $\gamma=0$ ), isto é, o sistema não faz uso de encaminhamento alternativo. O gráfico

obtido é mostrado na figura 1 onde  $A=6er1$  e  $N=6$ . Note que a curva é a mesma para todos os limiares e também para todas as alternativas. Nesta condição a fórmula de Erlang-B é aplicável. Veja que o bloqueio médio cresce de forma não linear (quadrática como será visto) com o desbalanceamento.

FIG-1 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
GAMA=0 ALT=1, 2, 3 A=6er1



As figuras 2 a 4 representam os gráficos para os parâmetros  $\gamma=0.5$ ,  $A=6er1$  e  $\beta$  variando de 0 até 1, para cada uma das três alternativas. Note que a curva de bloqueio médio para um limiar igual a 7 ( $L=N+1$ ) coincide com curva de bloqueio médio para  $\gamma=0$  (flexibilidade nula). Pode ser observado que quanto menor for o limiar, menor é também a probabilidade de bloqueio; no entanto a partir do limiar 6 ( $L=N$ ) o maior ganho relativo é obtido quando se passa para o limiar 5 ( $L=N-1$ ), sendo que os limiares restantes proporcionaram melhoria equivalente.

FIG-2 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
 $\text{GAMA}=0.5$   $\text{ALT}=1$   $A=6er1$

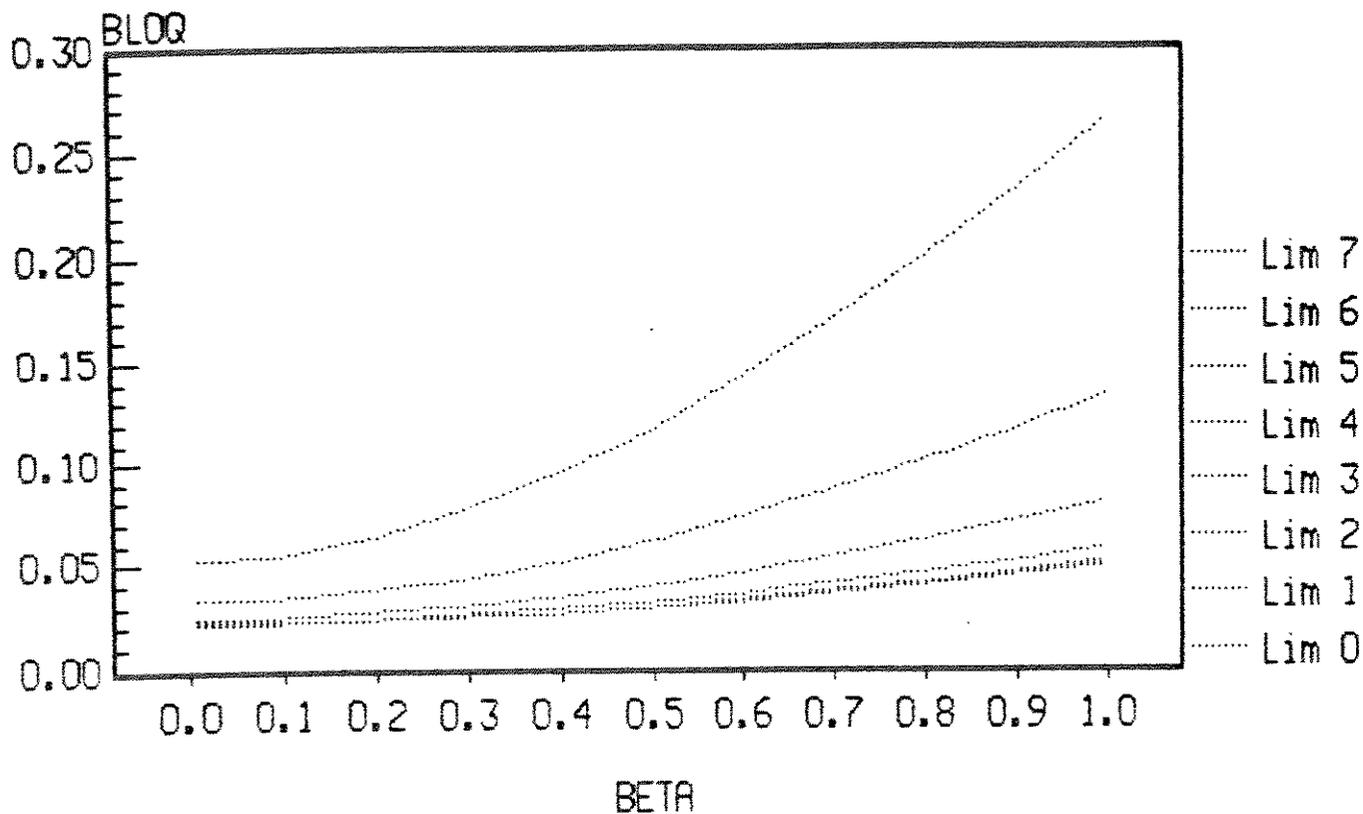
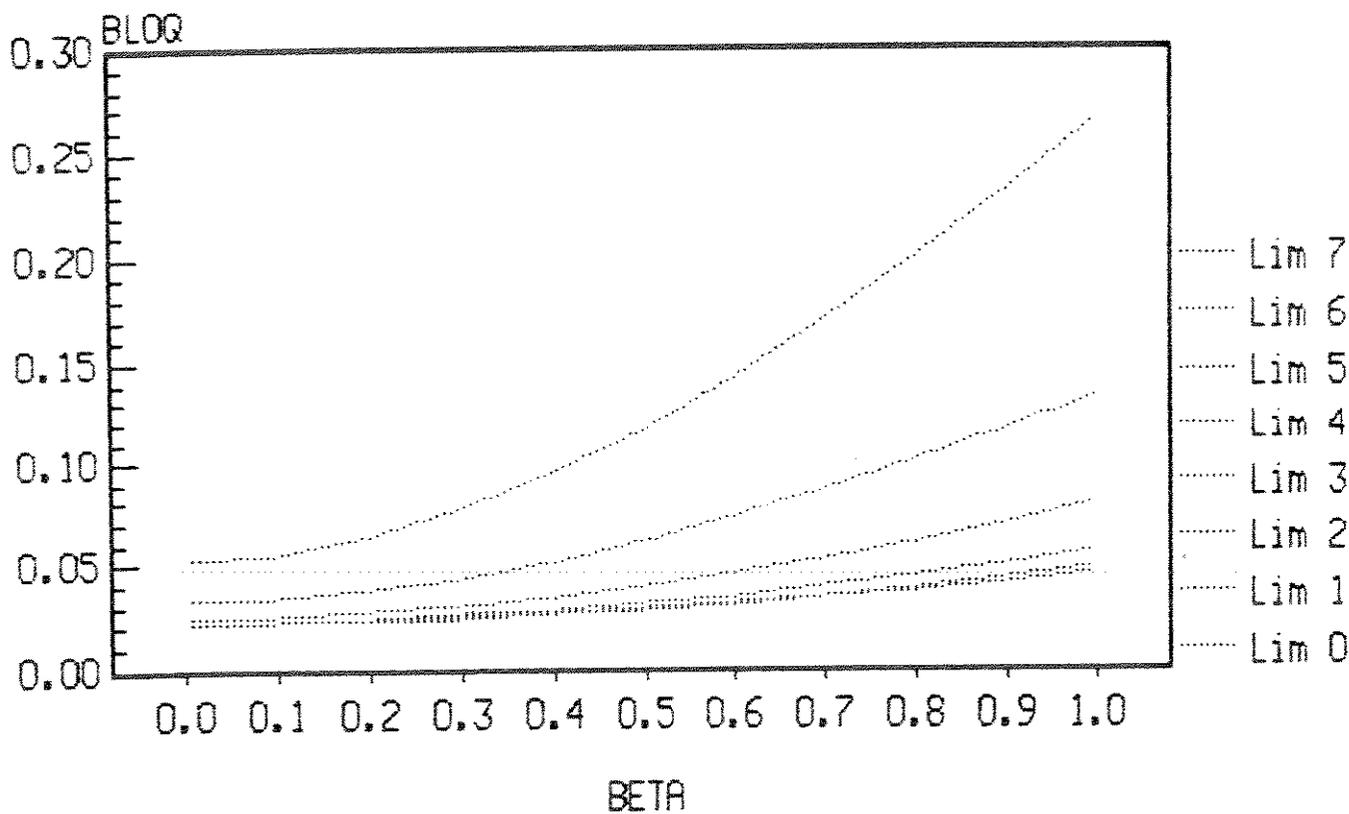
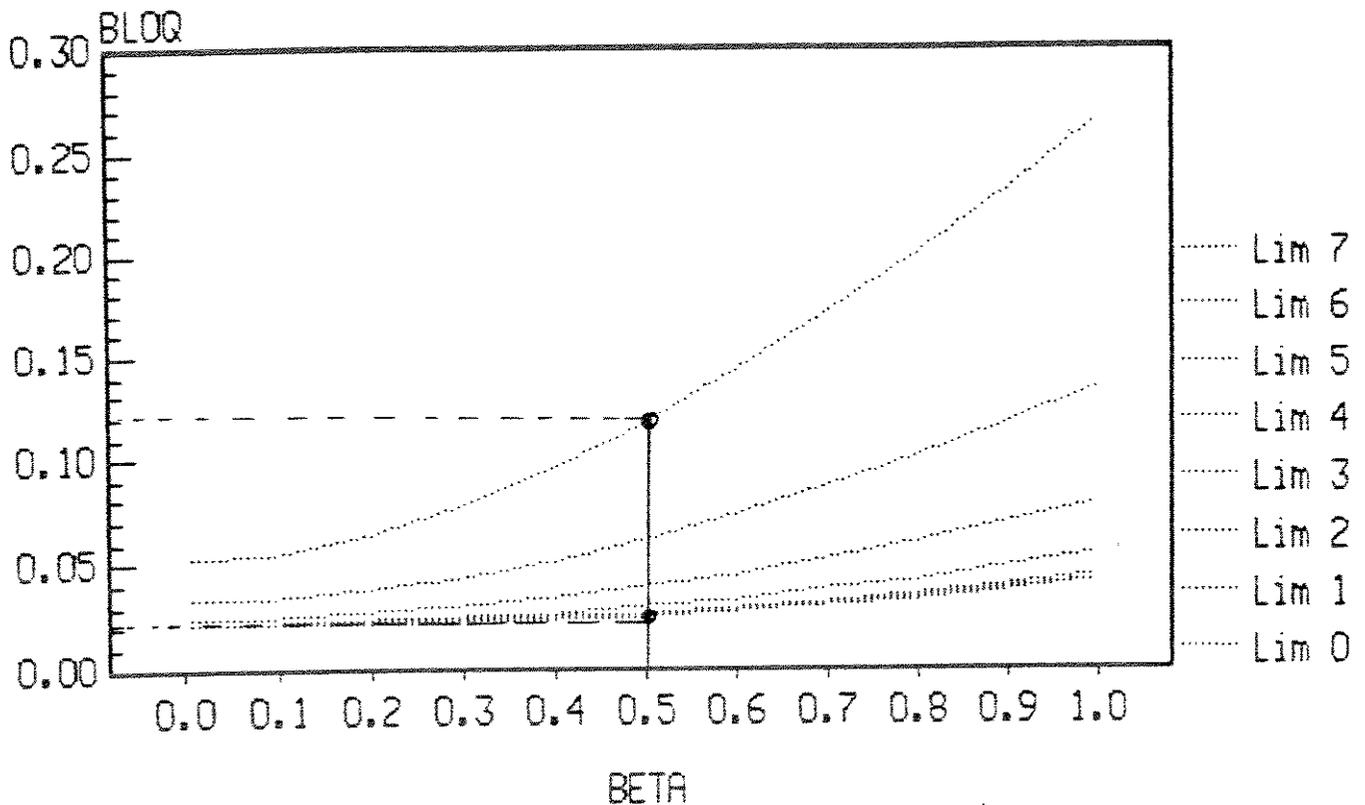


FIG-3 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
 $\text{GAMA}=0.5$   $\text{ALT}=2$   $A=6er1$



Veja que a curva superior representa o limiar  $L=N+1$  onde não há utilização da técnica; ai a fórmula Erlang-B se aplica. A partir de  $L=N$  o ganho passa a ser bastante significativo em termos de probabilidade de bloqueio. Note que, para limiares baixos ( $L \leq 3$ ) as curvas praticamente são coincidentes. Para se ter uma idéia do ganho obtido com a aplicação da técnica temos que para  $\gamma=0,5$ ,  $\beta=0,5$   $Alt=3$  (Fig-4) o bloqueio cai de 12% em  $L=7$  para 2% em  $L \leq 3$ .

FIG-4 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
GAMA=0.5 ALT=3 A=6er1



A figura 5 mostra uma comparação das três alternativas, onde pode observar-se que o melhor desempenho é o da alternativa 3, ou seja, quando o sistema envia o tráfego alternativo para a célula menos carregada.

Na figura 6 é utilizado o parâmetro  $\gamma=1$ ; neste caso as células podem ser consideradas como uma só. Aqui o parâmetro  $\beta$  não influe ao aplicarmos a técnica Variação do Limiar de Bloqueio (para  $L < N+1$ ).

FIG-5 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
 $\text{GAMA}=0.5$   $\text{ALT}=3$   $\text{A}=6\text{er}1$ .

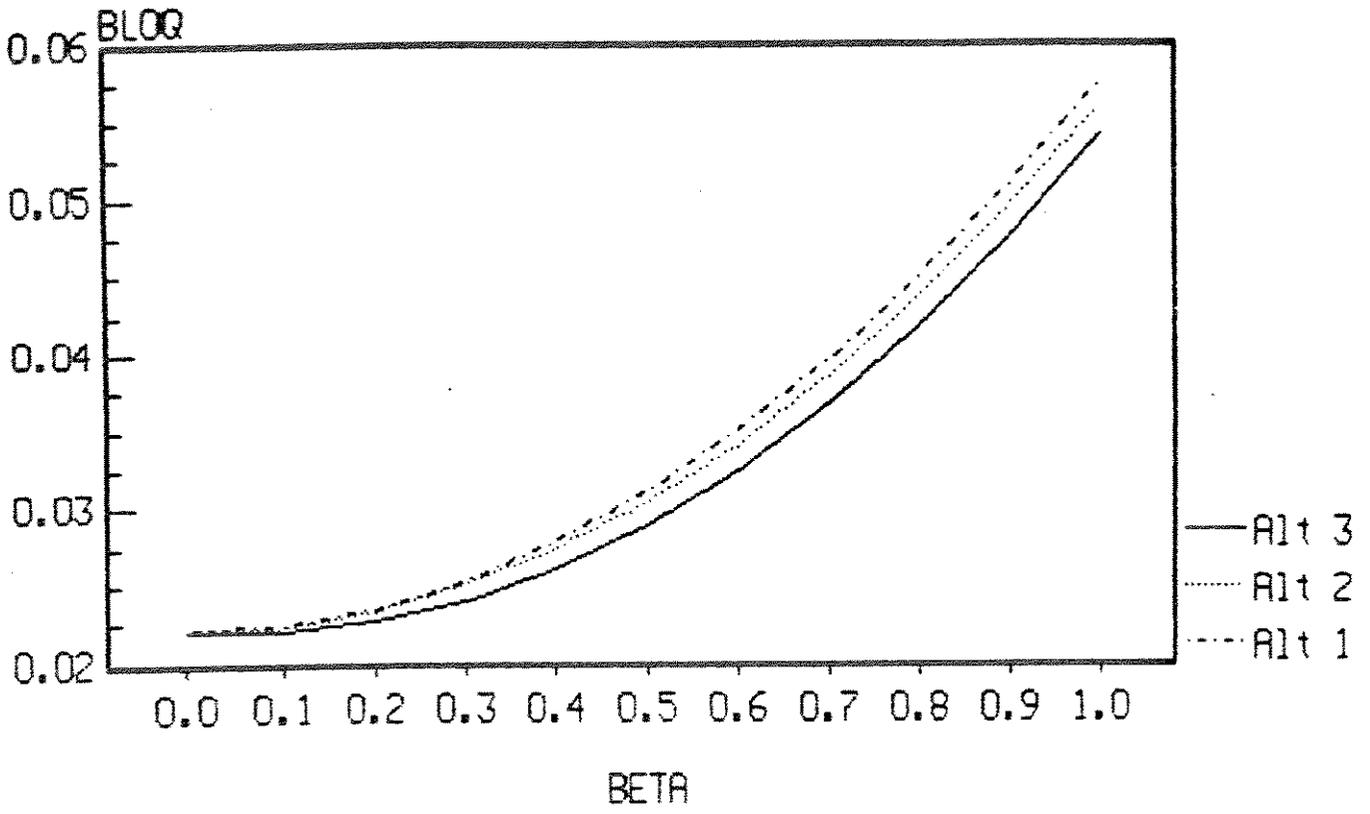
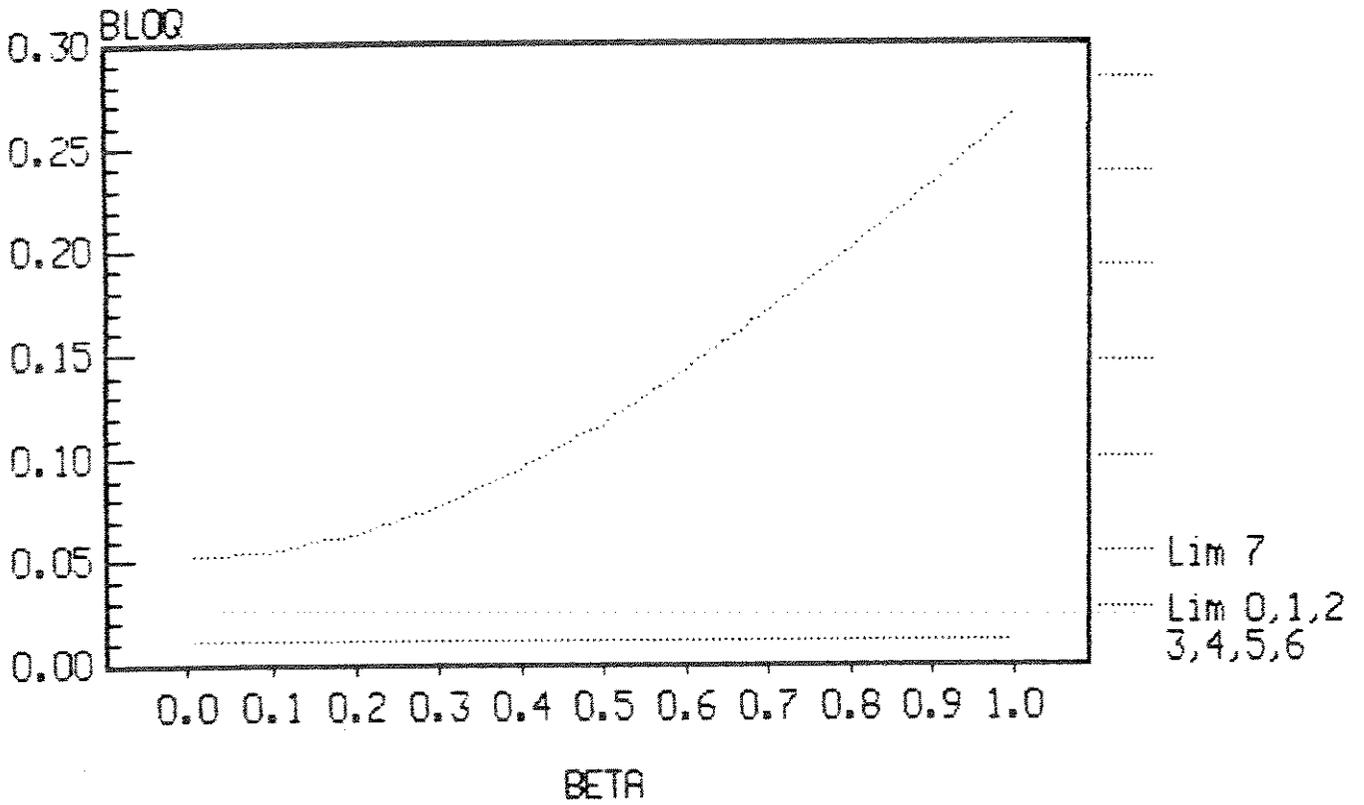


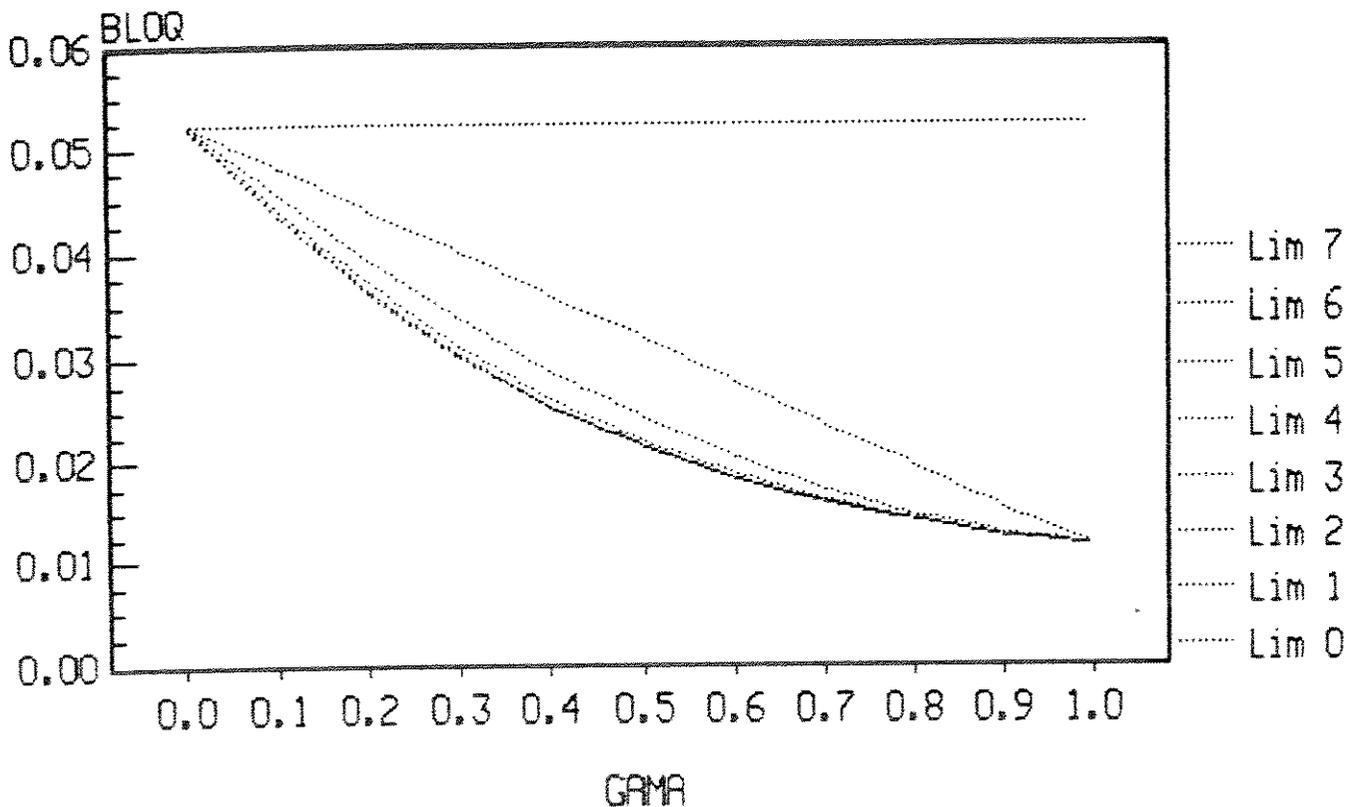
FIG-6 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
 $\text{GAMA}=1$   $\text{ALT}=1, 2, 3$   $\text{A}=6\text{er}1$ .



## VII.2-Bloqueio Médio versus Flexibilidade

Seja agora o caso em que o parâmetro flexibilidade  $\gamma$  varie mantendo-se os demais parâmetros fixos. As figuras 7, 8, e 9 representam o desempenho do sistema, para esta condição em que adotamos,  $\beta=0, 0.5, e 1$  respectivamente para um tráfego  $A=6er1$ ,  $N=6$  e alternativa 1.

FIG-7 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
BETA=0 ALT=1 A=6er1.



Note que para  $\gamma=0$  (flexibilidade nula) a estratégia independe do limiar adotado, o mesmo acontecendo para um limiar  $L < N+1$ , onde a fórmula Erlang-B se aplica. Para  $L=N+1$  (Lim 7) a estratégia independe de  $\gamma$ .

Na Fig-9 podemos observar que a probabilidade de bloqueio cai de 26,5% para 5% quando se utiliza a variação do limiar de bloqueio para os parâmetros  $\gamma=0,5$ ,  $Alt=1$ , e  $\beta=1$  ou seja sistemas completamente desbalanceados.

FIG-8 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
 BETA=0.5 ALT=1 A=6er1.

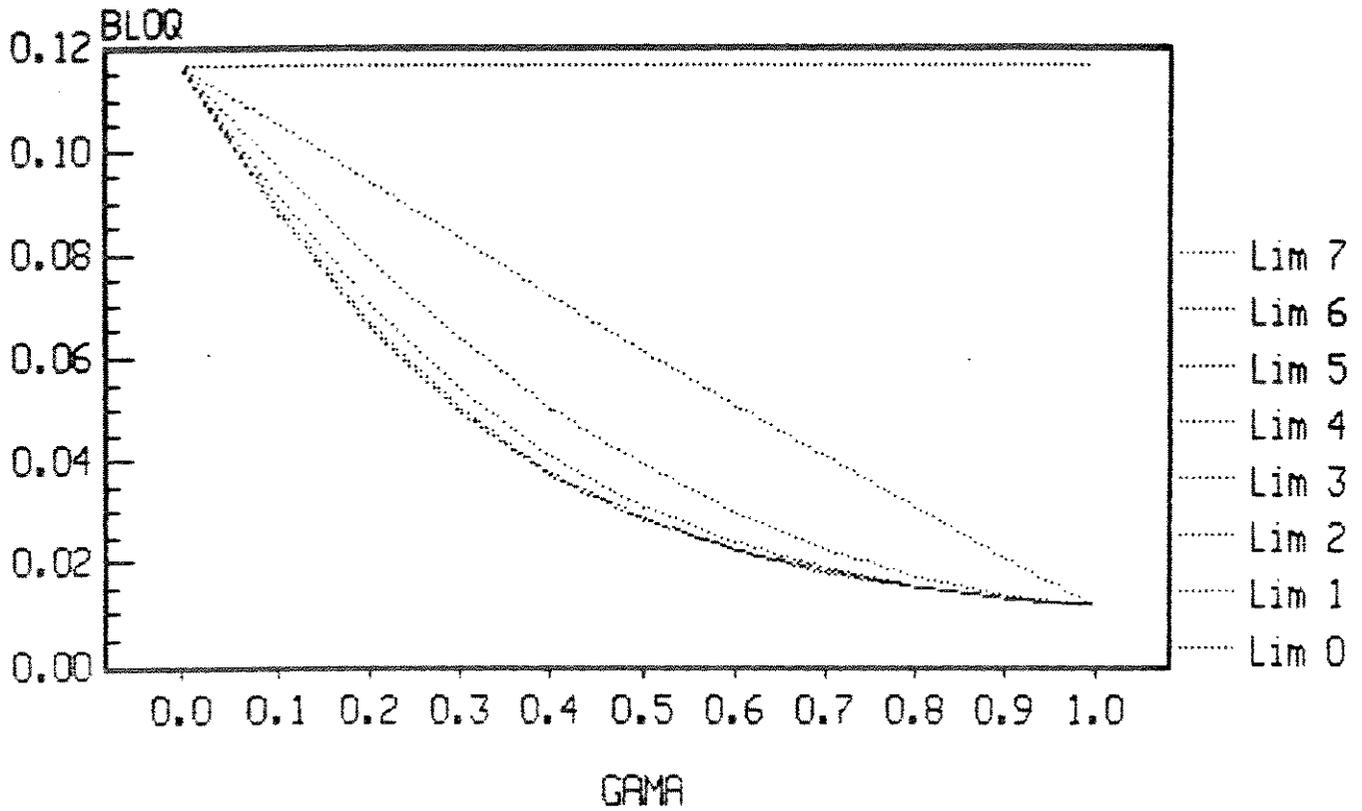
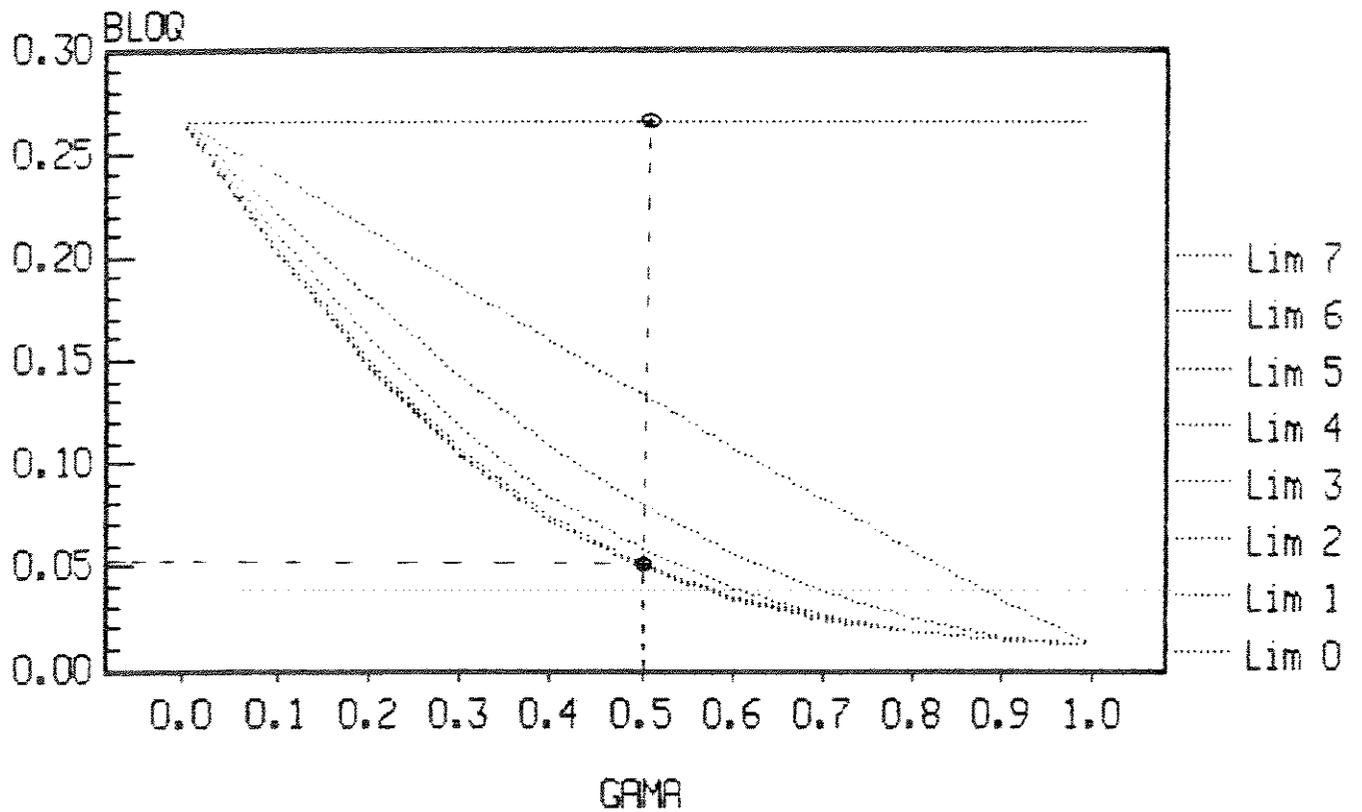


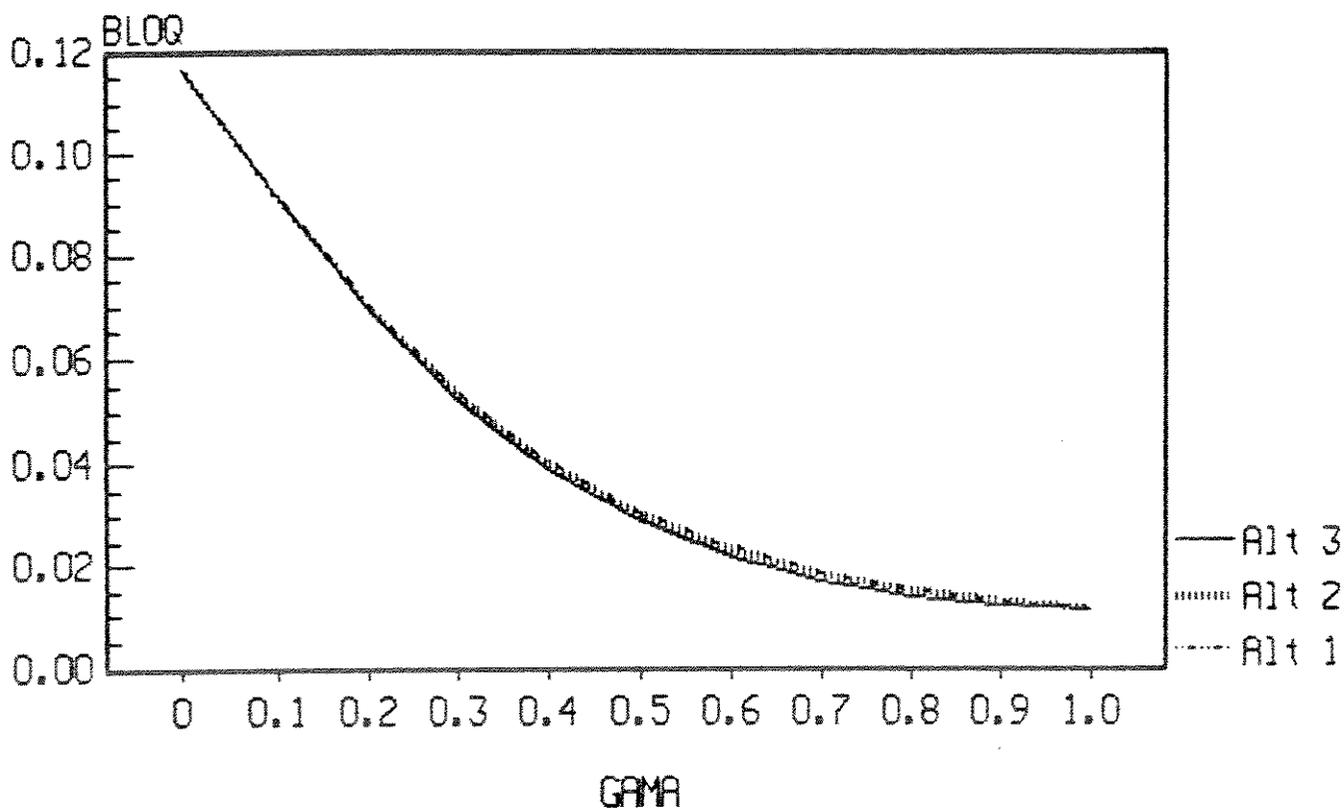
FIG-9 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
 BETA=1 ALT=1 A=6er1.



Observa-se através dos três gráficos anteriores que os sistemas melhor balanceados (Beta próximo ou igual 0) apresentam um melhor desempenho; porém independentemente da proporção de desbalanceamento, a utilização da Variação do Limiar de Bloqueio reduz a probabilidade de que o bloqueio ocorra.

A figura 10 compara as três alternativas para um limiar  $L=4$  e desbalanceamento  $\beta=0.5$ .

FIG-10 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
BETA=0.5  $\rho=6er1$  L=4



### VII.3-Bloqueio Médio versus Tráfego

Nas figuras 11, 12, e 13 podemos ver o comportamento do sistema, quando é variado o tráfego. Observa-se que no intervalo de probabilidade de bloqueio de 2% a 20%, a técnica proposta tem melhor desempenho.

FIG-11 BLOQUEIO X TRAFEGO  
 BETA=0.5 GAMA=0.5  
 ALT 1 A=Ser1.

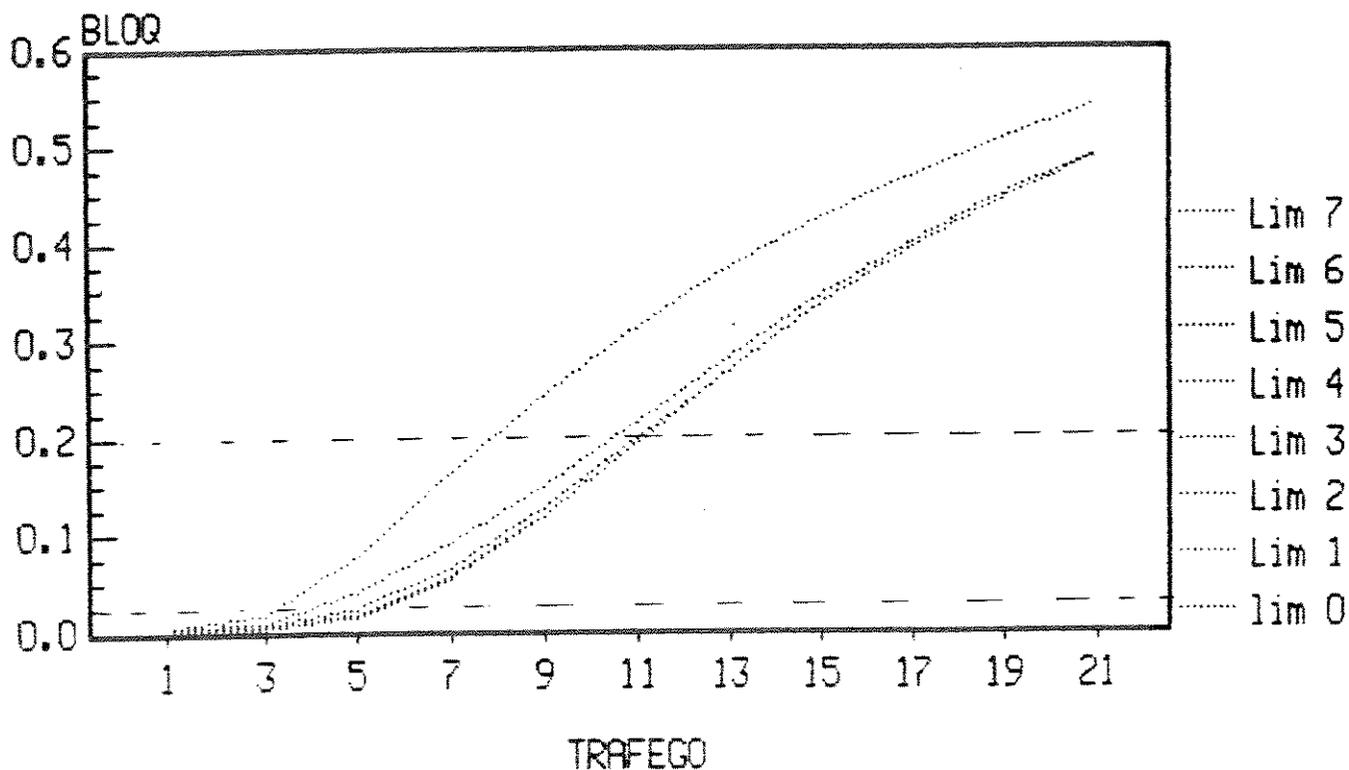


FIG-12 BLOQUEIO X TRAFEGO  
 BETA=0.5 GAMA=0.5  
 ALT= 2

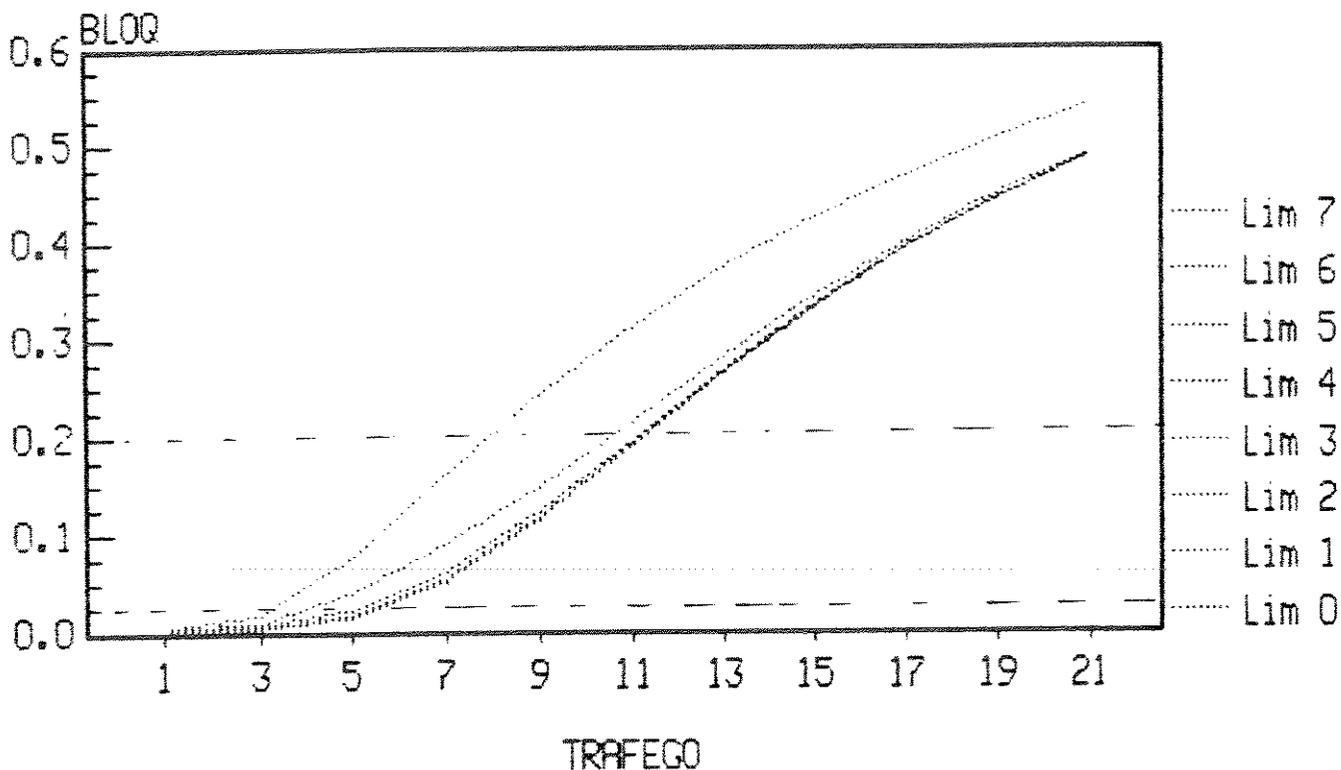
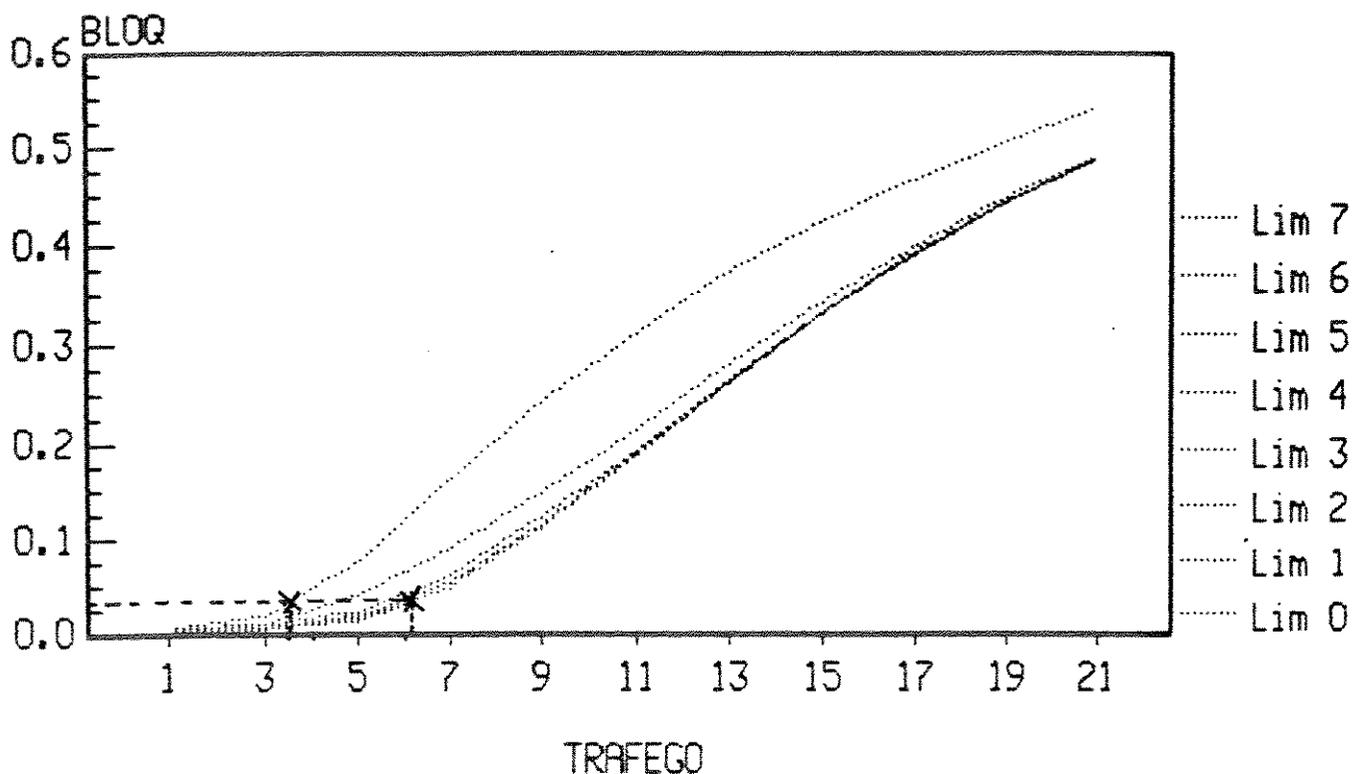


FIG-13 BLOQUEIO X TRAFEGO  
 BETA=0.5 GAMA=0.5  
 ALT=3



É possível verificar que para um bloqueio médio de 5%, o ganho em tráfego é maior que 50% quando se usa a estratégia com limiar  $L \leq 4$ .

Veja que na Fig-13 existe um aumento da capacidade de escoamento de tráfego de 3,5erl para 6,5erl que representa um ganho em torno de 90%, para uma probabilidade de perda de aproximadamente 3%, e valores de  $\gamma=0.5$   $\beta=0.5$  e  $Alt=3$ .

#### VII.4-Modelo Computacional versus Modelo Analítico Aproximado

Nas figuras 14 a 18 é feita uma comparação do comportamento tanto do modelo computacional, como do modelo analítico para baixo tráfego. Veja que o modelo aproximado dá excelentes resultados para grande variação dos parâmetros de tráfego (Modelo aproximado ver equação (8) do capítulo VI)

FIG-14 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
 BETA=0 A=3er1. L=4  
 (comparacao A e C)

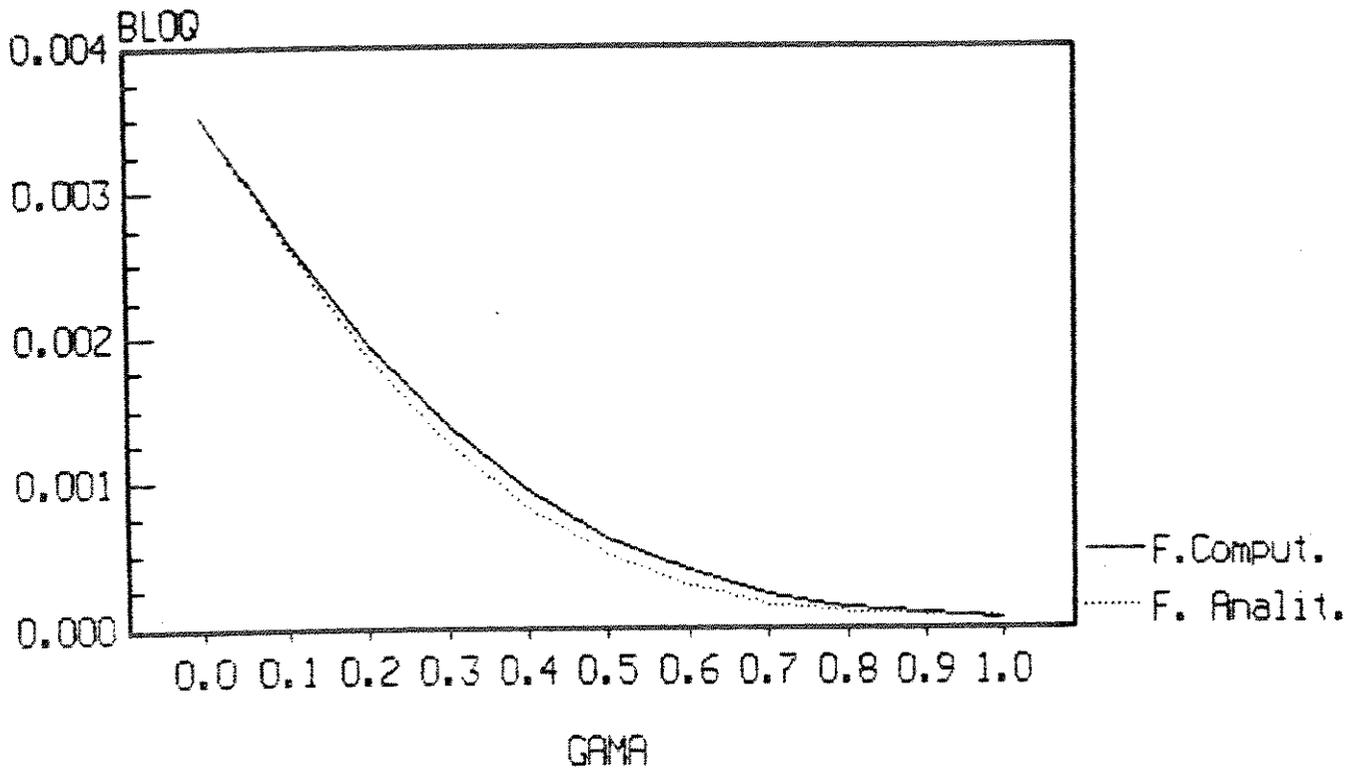


FIG-15 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
 BETA=0.5 A=3er1. L=4

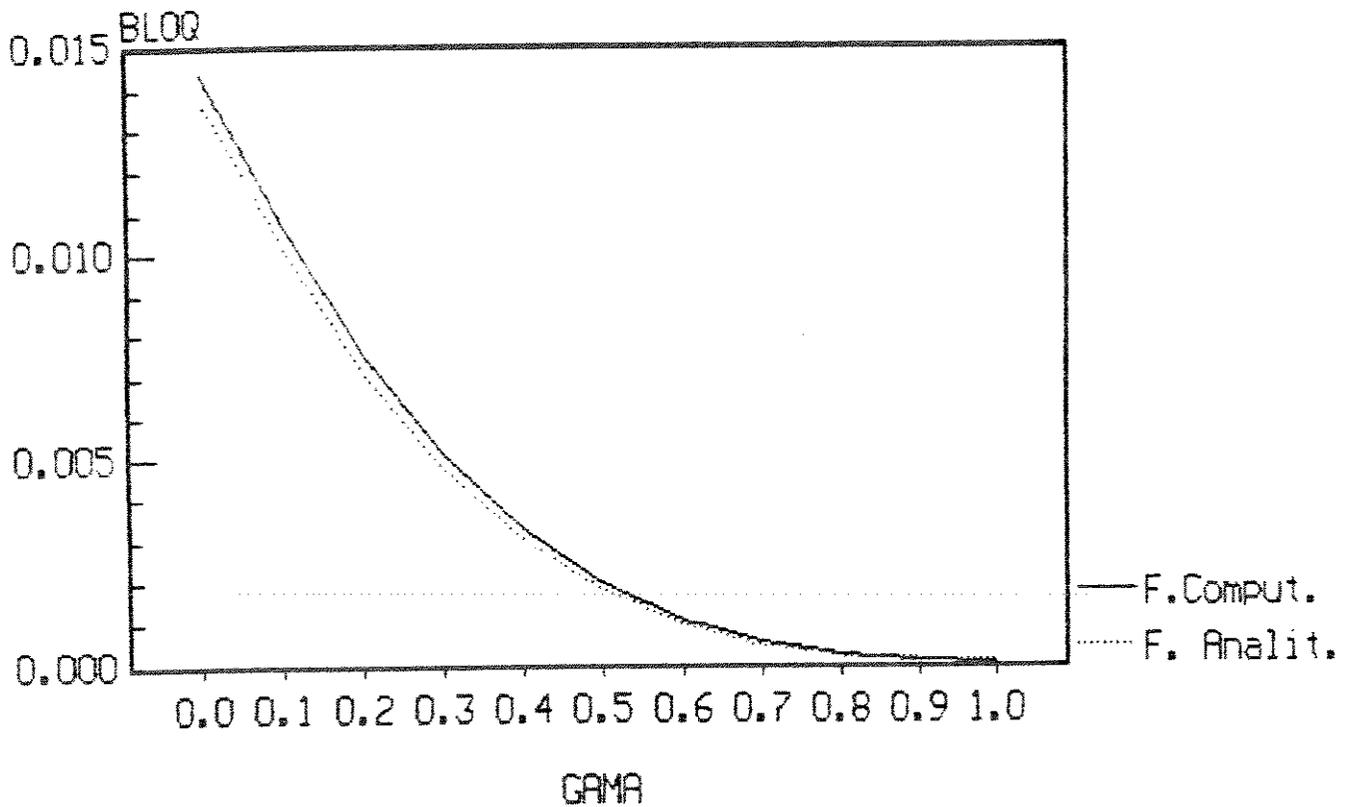


FIG-16 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
 $\text{GAMA}=0$   $A=3e1$ ,  $L=4$   
 (comparacao A e C)

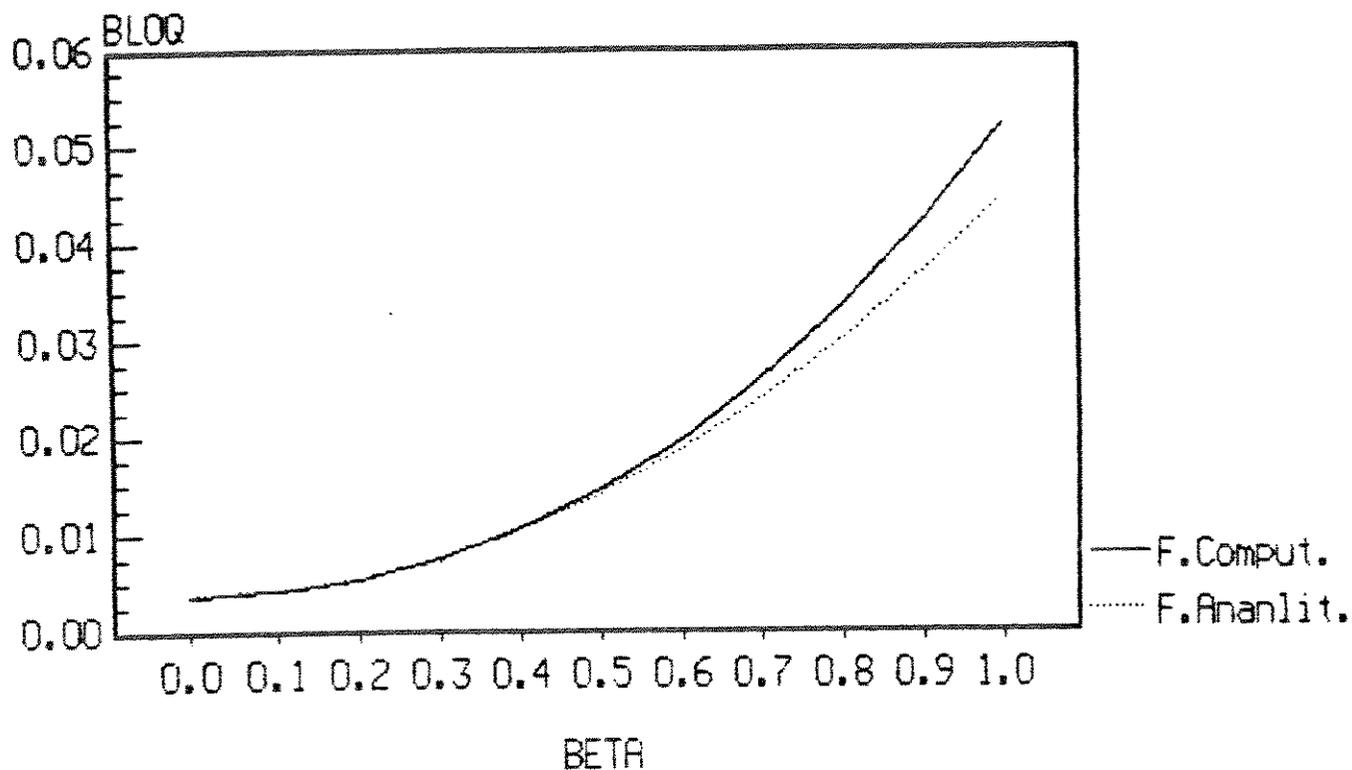


FIG-17 BLOQUEIO X DESBALANCEAMENTO  
 $\text{GAMA}=0.5$   $A=3e1$ ,  $L=4$

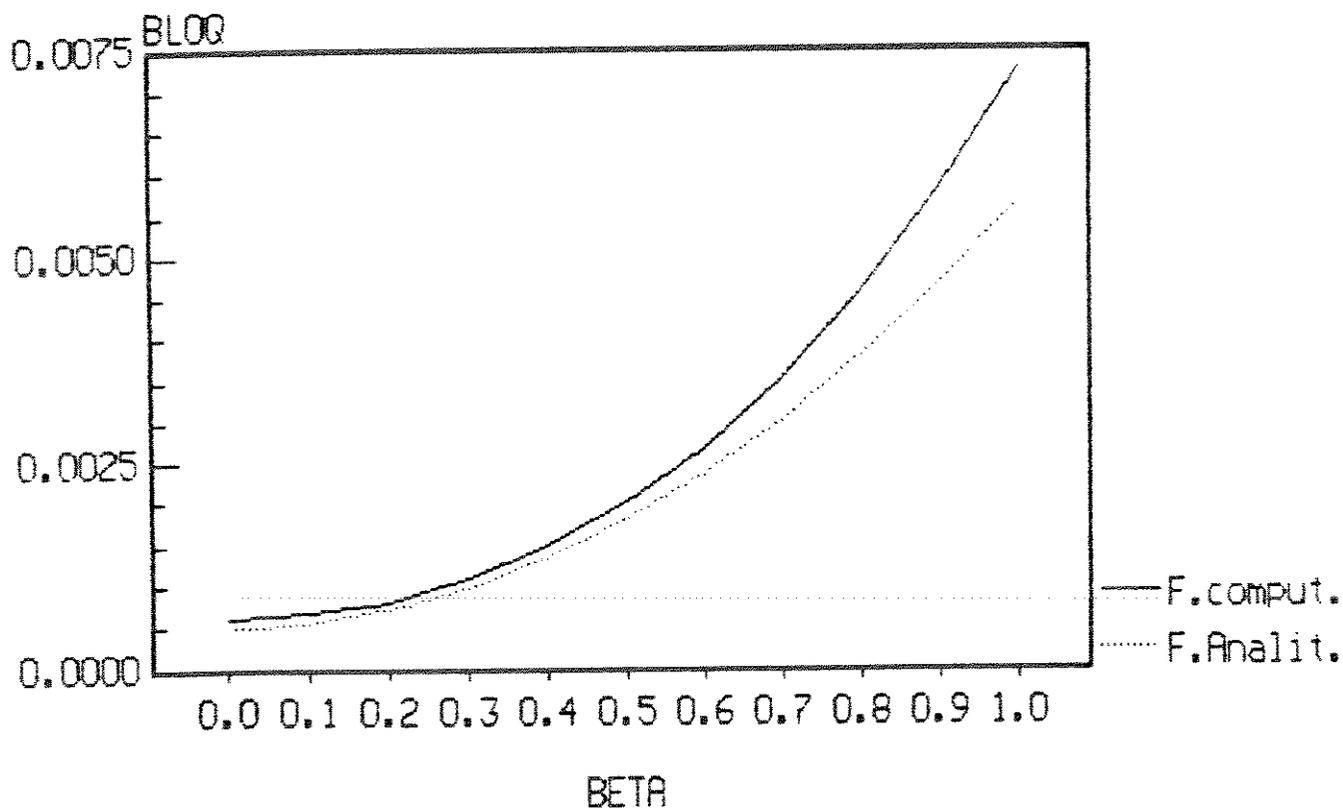
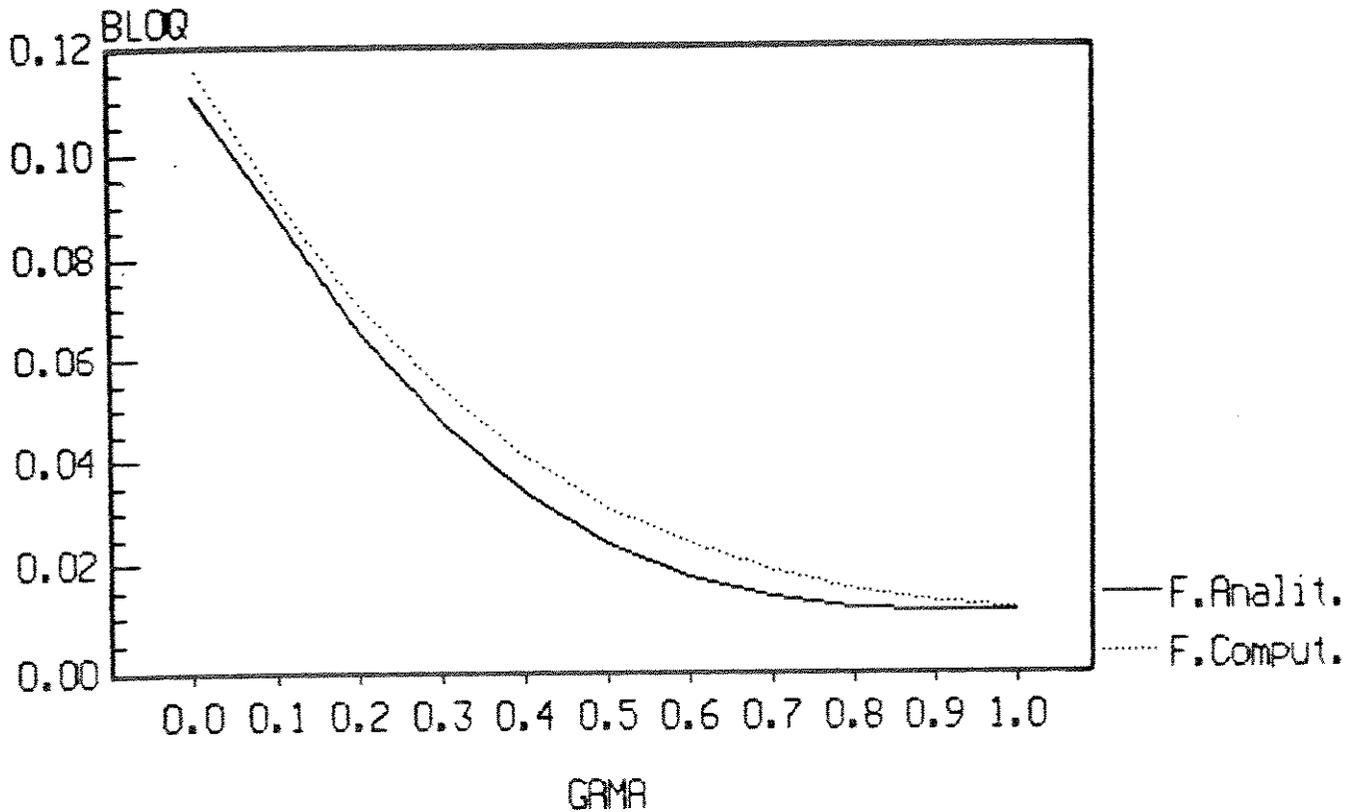


FIG-18 BLOQUEIO X FLEXIBILIDADE  
 BETA=0.5 A=6er1. L=4



Observamos através das figuras apresentadas ao longo deste capítulo, que a utilização da técnica Variação do Limiar de bloqueio reduz a probabilidade de bloqueio de um sistema de comunicações móveis. Lembramos que alguns (Exemplo:  $\gamma=1$  e  $\beta=1$ ) não se aplicam em casos reais, porém nos servem para fins de análise. Valores reais para estes parâmetros giram em torno de 20 e 40% para flexibilidade e desbalanceamento, sendo que para estes valores esta técnica apresenta bons resultados.

No seguinte capítulo serão apresentados comentários conclusivos sobre os resultados obtidos com a aplicação da técnica aqui estudada.

## C A P Í T U L O VIII

### C O N C L U S Õ E S

#### VIII.1-Principais Conclusões

O colossal acelerado crescimento dos sistemas de rádio móvel celular tem provocado o aparecimento de várias técnicas de melhoria do desempenho de tráfego, a maioria delas ainda na forma de propostas que servem de subsídio para investigações de pesquisa. Um grande problema de várias destas técnicas é que elas podem envolver uma mudança substancial nos padrões de reutilização de frequência, no "hardware" do sistema, e/ou complicar o processo de controle. Este trabalho de tese teve como proposta a investigação do desempenho do sistema de comunicações móveis onde se aplica uma nova técnica de encaminhamento alternativo. Esta nova técnica sugerida neste trabalho de tese utiliza o tráfego disponível nas fronteiras entre células, que tem uma comunicação adequada com mais de uma estação rádio base.

Através de cálculos geométricos bastante simples foi possível conjecturar sobre a proporção de tráfego flexível para ser encaminhado para uma ou outra célula. De fato, estudos mais rigorosos [4] mostram que 40% do tráfego total de uma célula pode ser considerado como disponível para encaminhamento alternativo.

A idéia da técnica proposta é baseada numa já existente "Directed Retry" [10] ou ARB [4] onde (no "Directed Retry" ou ARB) o tráfego flexível de uma dada célula é enviado para outra apenas na condição em que sua própria célula esteja bloqueada. Na nova técnica proposta a idéia é não esperar que a célula entre no estado de bloqueio para só depois haver encaminhamento alternativo. Ao invés disto, define-se um limiar de bloqueio menor ou igual à capacidade máxima de canais da célula, a partir do qual o

encaminhamento poderá ocorrer. Seja  $N$  o número de canais por célula e  $L$  o limiar de bloqueio estabelecido; se  $L=N+1$  significa que em nenhum instante vai ocorrer o desvio de tráfego flexível para outra célula já que a célula jamais alcançará o estado em que  $N+1$  canais estão bloqueados. Para  $L = N$  a estratégia proposta coincide com a "Directed Retry" (ou ARB) e para  $0 \leq L < N$  melhores resultados são esperados.

O processo de tráfego do sistema foi modelado através da cadeia de Markov que, em particular para um sistema de 2 células, se constitui no processo de nascimento e morte com diagrama de estados bidimensional. A solução de problema consistia em se determinar as probabilidades de estado e mais precisamente as probabilidades dos estados de bloqueio das células. A referida solução não é trivial e se baseia na inversão de uma matriz com  $[(N+1)^2 * (N+1)^2]$  elementos, o que, dada a complexidade, não aparece em forma analítica fechada, sendo necessário o uso de recursos computacionais.

O desempenho do sistema foi avaliado através da probabilidade média de bloqueio, em função de vários parâmetros, quais sejam: (i) número de canais por célula, (ii) tráfego total (iii) desbalanceamento de tráfego entre células, (iv) proporção de tráfego flexível, (v) limiar de bloqueio.

Além do procedimento geral descrito para a estratégia proposta, algumas variantes da mesma existem no que concerne ao fato de ambas as células apresentarem o mesmo número de canais ocupados, dado que este número é maior ou igual ao limiar de bloqueio:

- Alternativa 1: mantém o desbalanceamento do sistema;
- Alternativa 2: divide igualmente o tráfego flexível entre as células;
- Alternativa 3: envia o tráfego flexível para a célula menos sobrecarregada.

Da mesma forma a performance destas alternativas foi analisada à luz dos parâmetros acima mencionados.

Apesar da complexidade do problema, soluções analíticas para casos especiais podem ser obtidas, e estas soluções servem de parâmetro para a validação do modelo computacional implementado. Em particular para o caso em que (i) não existe flexibilidade, (ii) a flexibilidade é total e/ou (iii) o limiar de bloqueio é  $L=N+1$ , a fórmula Erlang-B se aplica. Outros casos particulares incluem solução para baixo tráfego onde uma fórmula aproximada foi obtida. Esta fórmula serviu para mostrar que o bloqueio médio (i) é uma função quadrática do desbalanceamento; (ii) decresce com o aumento da flexibilidade de uma maneira monotônica; (iii) decresce exponencialmente com o aumento do limiar dado um número de canais e tráfego total. Além disto a aproximação de baixo tráfego serviu para uma avaliação comparativa inicial das três alternativas da estratégia.

Os resultados obtidos através da solução numérica por computador foram promissores e confirmaram as soluções analíticas. Em particular, a solução de baixo tráfego também funcionou razoavelmente bem para tráfego médio com erros bastante pequenos, como foi mostrado na figura 18 do capítulo anterior.

Para o caso geral verificou-se que existe um aumento substancial da capacidade de tráfego do sistema com a aplicação da técnica de roteamento alternativo proposta. No que concerne ao limiar de bloqueio, o maior ganho se obtém quando o limiar passa de  $N$  para  $N-1$ , (estamos considerando já o uso de tráfego flexível, ou seja  $L < N+1$ ) partir daí e até  $L=0$ , os ganhos obviamente existem, e é máximo para  $L=0$ , mas relativamente não são tão grandes. Isto sugere, por exemplo, que podemos reservar alguns canais para uso restrito, tal que combinado com a técnica de roteamento alternativo a performance do sistema não fica de modo algum degradada; ao contrário é bastante melhorada.

Estritamente falando é possível concluir que a alternativa 3 tem um desempenho melhor que a alternativa 2 que por sua vez

desempenha melhor que a alternativa 1. De fato, o ganho obtido por uma ou outra é aproximadamente igual o que nos leva a sugerir que no caso em que ambas as células apresentam o mesmo número de canais ocupados, e este número é maior ou igual ao limiar de bloqueio, então torna-se uma decisão aleatória para se determinar que célula recebe tal chamada.

## VIII.2-Considerações Finais

Os parâmetros de tráfego do modelo proposto foram exaustivamente variados, e para qualquer caso, tanto em termos de flexibilidade ( $\gamma$ ) como de desbalanceamento ( $\beta$ ), a técnica proposta apresenta um melhor desempenho, em relação a sistemas sem roteamento alternativo, e em relação à técnica "Directed Retry" (mencionada no primeiro capítulo), que é a única implementada até esta data.

Outras conclusões a que chegamos são mencionadas a seguir:

-Redução do bloqueio de "Hand-over" em consequência da redução do bloqueio total, e também por que a partir de um limiar "L" escolhido, as células tendem a enviar todo seu tráfego flexível para célula menos sobrecarregada, escoando unicamente seu próprio tráfego fixo. Poderíamos também, em determinados casos, reservar canais unicamente para tráfego de "Hand-over".

-Tendência a balancear a carga de tráfego do sistema.

Em sistemas que não utilizam roteamento alternativo (ou Variação do Limiar de Bloqueio no nosso caso), pode-se dar o caso de uma célula ter todos seus canais ocupados, enquanto a outra, tem todos os seus livres. Na nossa proposta esta possibilidade é minimizada, pelo fato de as células sempre tenderem a enviar o tráfego alternativo para a célula menos sobrecarregada; e considerando que este representa um 40% do tráfego total, as chances de desbalanceamento são mínimas.

-Melhor aproveitamento do tráfego fixo.

Em sistemas sem Variação do Limiar de Bloqueio, quando uma célula tiver todos seus canais ocupados, e uma nova chamada considerada fixa aparecer no sistema ou na célula, esta será bloqueada. No nosso caso esta probabilidade é reduzida, pois a partir do limiar escolhido a célula tende a escoar unicamente seu tráfego fixo, não tendo que competir com o tráfego flexível ou alternativo.

### VIII.3-Trabalhos futuros

Em relação à fórmula analítica aproximada encontrada (equação (28), capítulo VI), verificou-se que os resultados obtidos são bem próximos dos valores exatos. Note, no entanto, que a medida que o valor do limiar L vai aumentando o bloqueio médio deveria tornar-se cada vez menos independente do tráfego flexível, até o ponto em que para  $L=N+1$  esta independência deveria ser total. Isto, no entanto, não é expresso pela fórmula. Levando-se agora isto em consideração propomos a seguinte fórmula heurística para ser testada futuramente.

$$B_m = E\left(\frac{A}{2}, N\right)(1+K/\beta^2)(1-\gamma)^{N-L+1} + \{\gamma [1-(1-\gamma)^{N-L+1}]\}^{1/N} E(A, 2N)$$

Uma proposta para trabalho futuro seria a de simular um sistema de grande porte através do uso de linguagem apropriada (SIMULA, SIMSCRIP, etc).

Outra proposta seria a de simularem-se sistemas de grande porte através das fórmulas aproximadas com os respectivos fatores de correção, em relação aos métodos computacionais aqui utilizados, o que a priori, podemos dizer, pouparia muito tempo de CPU, e de ocupação de memória RAM.

oooooooooooooooooooo

## BIBLIOGRAFIA

- [1] YOUNG, W.R., "Advanced Mobile Phone Service: Introduction, Background, and Objectives" The Bell System Technical Journal, January 1979
- [2] ERICSSON, "Informax", Marzo 1988 (Ref. Comercial)
- [3] FERRARI, A.M., "Telefonia Móvel Celular", Ericsson do Brasil, (publicação interna)
- [4] YACOUB, M.D., "Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries", PhD Thesis, University of Essex, England, May 1988
- [5] Ed. R. J. Holbeche, "Land Mobile Radio Systems", (IEE Telecommunications Series, 14), Peter Pelegrinus Ltd., 1985
- [6] LEE, W.C.Y., "Elements of Cellular Mobile Radio Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.vt-35, May 1986
- [7] APPLEBY, W.C. and GARRET, J., "The Cellular Radio Network, Part 1 - General Overview", British Telecommunications Engineering, Vol.4, July 1985
- [8] COX, D.C. and REUDINK, D.O., "A Comparison of Channel Assignment Strategies in Large-Scale Mobile Communications Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-20, Nº 2, April 1972
- [9] ANTENNAS SPECIALISTS, "Dynamic Frequency Allocation Increases Cellular Efficiency", Communication Engineering International, November 1986
- [10] EKLUNDH, Berth, "Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry",

11<sup>th</sup> ITC, April 1985

- [11] SOUZA, J.M. e PISSOLATO, E.L., "Análise de Desempenho", Apostila do curso Telefonia Digital, FEE-UNICAMP, 1989
- [12] TAHA, H.A., Investigacion de Operaciones, México, 1981
- [13] KLEINROCK, *Queueing Systems*, Vol. 1, John Wiley & Sons, 1975
- [14] W.C. Jackes Jr *Microwave Mobile Communications Systems*, John Wiley & Sons, 1974
- [15] W.C.Y Lee, *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, 1982
- [16] MACDONALD, V., "The Cellular Mobile Radio", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.vt-35, №2, May 1979
- [17] J.D. Parsons, J.G. Gardiner, *Mobile Communications Systems*, Blackie & Sons LTD, 1989
- [18] STARAS, H. and SCHIFF, L., "A Dynamic Space Division Multiplex Mobile Radio System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.-vt-19, Num-2, May 1970, pp. 206-213
- [19] STARAS, H. and SCHIFF, L., "Spectrum Conservation in the Land Mobile Radio Service", IEEE Spectrum, July 1971, pp. 28-36
- [20] BACKRY, S. and ACKROYD, M., "Teletraffic Analisis for Multicell Mobile Radio Telephone Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-29, № 3, March 1981, pp. 298-304
- [21] COX, D.C., "Co-Channel Interference Considerations in Frequency Reuse Small - Coverage - Area -Real Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-30, № 1, January 1982, pp. 135-142

- [22] BACKRY, S. and ACKROYD, M., "Teletraffic Analysis for Single Cell Mobile Radio Telephone Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-29, March 1981
- [23] MACFADYEN, N. and EVERITT, D., "Teletraffic Problems in Cellular Mobile Radio Systems", ITC II, Kyoto, September 1985, pp. 2.4.B-1-1 - 2.4.B-2-5
- [24] POSNER, E. and GUERIN, R., "Traffic Policies in Cellular Radio that Minimize Blocking of Hand off Calls", ITC, Kyoto, Septembre 1985, pp. 2.4.B-2-1 - 2.4.B-2-5
- [25] AVELLANEDA, O., PANDA, R. and BRODY, G., "Traffic Modeling of a Celular Mobilie Radio System", ITC II, Kyoto, September 1985, pp. 2.4.B-4 - 2.4.B-4-7
- [26] CHAN, G., "Interference Analysis of a Land Mobile Cellular Radio System", Electromagnetic Compatibility 1985, 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, March 1985, pp. 469-474
- [27] HUGHES, C. and APPLEBY, M., "Definition of a Cellular Mobile Radio System", IEEE Proc., Vol 132, August 1985, pp. 416-424
- [28] CATTERMOLE, K.W., "Alternative Routing in Cellular Mobile Radio", Univ. of Essex, International Publication, 1986
- [29] HONG, D. and RAPPAPORT, S., "Heuristic Channel Assignments for Cellular Land Mobile Radio Systems", IEEE CH 2190-7/85/0000-0997, 1986, pp. 32.6.1-32.6.5
- [30] LEE, W., "Elements of Cellular Mobile Radio", IEEE Transactions on Communications, Vol. VT-35 Num.2 May 1986, pp. 48-56
- [31] FURUYA, Y. and AKAIWA, Y., "Channel Segregation, a Distributed

Channel Allocation Scheme for Mobile Communication Systems",  
Proc. Second Nordic Sem. on Digital Land Mobile Communication,  
October 1986, pp.311-315

- [32] GREVEL, M. and SACHS, A., "A Graph Teorical Analysis of Dynamic Channel Assignment Algorithms of Mobile Radio Communications Systems", Siemens Forsch.-u. Entwickl.-Ber.Bd, 12 (1983) Nr.5 pp. 298-305
- [33] BRON, C. and KERBOSCH, J., "Finding All Cliques of an Undirected Graph" Communications of the ACM, Vol.16, Num.9, September 1973, pp. 575-577
- [34] HALE, W., "Frequency Assignment, Theory and Applications", Proc. IEEE, Vol.68, Num.12, December 1980, pp.1497-1514
- [35] ZOELLNER, J. and BEALL, C., "A Breakthrough in Spectrum Conservine Frequency Assignment Technology", IEEE Trans., on Elect. Comp., Vol. EM-19, August 1977, pp. 313-319
- [36] BOX, F., "A Heuristic Technique for Assigning Frequencies to Mobile Radio Nets", IEEE Trans., on Veh. Tech., Vol.Vt-27, Num 2, May 1978, pp. 57-74
- [37] DIKOKU, K. and OHDATE, H., "Optimal Design for Cellular Mobile Systems", IEEE Trans., on Veh. Tech. Vol.Vt-34, Num.1, February 1985, pp. 3-12
- [38] FURUYA, Y. and AKAWA, Y., "Channel Segregation a Distributed Channel Allocation Scheme for Mobile Communication Systems", Proc. Second Nordic Sem. on Digital Land Mobile Communication, October 1986, pp. 311-315
- [39] KAHWA, T.J. and GEORGANAS, N.D., "A Hybrid Channel Assignment Scheme in Large-Scale, Cellular-Strutured Mobile Communication Systems", IEEE Trans., on Comm., Vol.Com-26, Num.4 April 1978, pp. 432-438

- [40] MCDONNELL, M. and GEORGANAS, N.D., "Combined Mobile Telephone and Dispatch Services in a Cellular Land Mobile Radio Systems", IEEE Proc. Vol. 131. July 1984, pp. 357-363
- [41] SIN, J. and GEORGANAS, N., "A Simulation Study of a Hybrid Channel Assignment Scheme for Cellular Land Mobile Radio Systems with Erlan-C Service", IEEE Trans., on Comm., Vol.Com 29, february 1981, pp.143-147
- [42] DURING, M., "Capacity of PSTN Mobile Telephone Network in View of Teh Special Requeriments from a Mobile Suscriber", ITC II, Kyoto, September 1985, pp. 2.4.B-3-1 - 2.4.B-3-7
- [43] ARAZI, B., "New Channel Assignment Strategy in Cellular Mobile Radio Communication Systems", IEEE Proc., Vol.133, Pt.F, Num 16, October 1986, pp. 569-575
- [44] COX, D.C. and REUDINK, D.O., "A Comparison of Some Channel Assignment Strategies in Large Scala Mobile Communication Systems", IEEE Trans., on Com., Vol.Com-20, Num.2 April 1972 pp. 190-195
- [45] SENGOKO, M., and MATSUMOTO, T., "A Dynamic Frequency Assignment Algorithm in Mobile Radio Communication Systems", The Trans., of the IEEE of Japan, Vol.E61, Num.7, July 1978, pp. 527-533
- [46] SENGOKU, M., "Telephone Traffic in a Mobile Radio Communication System Using Dynamic Frequency Assignments", IEEE Transaction on Vehicle Technology, Vol. VT-29 №2, May 1980, pp. 270-278
- [48] HALE, W., "Frequency Assignment: Theory and Applications", Proc. of IEEE Vol.68 December 1980, pp.1497-1514
- [49] GAMST, A. and RAVE, W., "On Frequency Assignment in Mobile

Automatic Telephone Systems", IEEE CH-1819-2/82-0000/0309, pp. 309-315

- [50] GREVEL, M. and SACHS, A., "A Graph Theoretical Analysis of Dynamic Channel Assignment Algorithms to Mobile Radiocommunication Systems", Siemens 1983, pp.298-305
- [51] HONG, D. and RAPPAPORT, S., "Heuristic Channel Assignments for Cellular Land Mobile Radio Systems", IEEE, CH-2190-7/85/0000-0997, 1985, pp. 32.6.1 - 32.6.5
- [52] GARDINER, J. and KOTSOPOULOS, S., "Relationship between Base Station Transmitter Multicompling Requirements and Frequency Planning Strategies for Cellular Mobile Radio", IEEE Proc., Vol.132, August 1985, pp. 384-387
- [53] MEYERHOFF, H., "Network Planning and Spectrum Efficiency", Cellular and Mobile Communication, Onning Publ., Pinner, Vol.12 1985, pp. 125-137
- [54] CHAN, G., and MAHMOUD, S., "A Spectrum Efficient Interference Free Frequency Allocation Scheme for a Cellular Radio Systems", IEEE Trans., on Veh., Vol.Vt-35, Num.1 February 1986, pp.15-21
- [55] ACKROYD, M. and SMITH, "Dynamic Channel Assignment and Adaptive Frequency Plans", IEEE, Colloquium on Digital Mobile Radio, October 1985, pp. 4/1-4/3
- [56] TAJIMA, J. and IMAMURA, K., "Flexible Channel Assigned High-Capacity Mobile Communication Systems", IEEE, CH-2314-3/86/0000-0072, 1986, pp. 3.4.1 - 3.4.6
- [57] SCHIFF, L., "Traffic Capacity of Three Types of Common-User Mobile Radio Communication Systems", IEEE Trans. on Commun. Tech., Vol. Com-18, № 1, February 1970, pp. 12-21

- [58] COX, D.C. and REUDINK, D.D., "Dynamic Channel Assignment in High-Capacity Mobile Communications Systems", The Bell Sys. Tech., Vol.50 № 6, August 1971, pp. 1833-1857
- [59] ENGEL, J.S. and PERITSKY, M.M., "Statistically - Optimum Dynamic Server Assignment in Systems with Interfering Servers", IEEE Trans. on Commun., Vol. Com-21 № 11, November 1973, pp.1287-1293
- [60] ANDERSON, L.G., "A Simulation Study of Some Dynamic Channel Assignment Algorithm in a High Capacity Mobile Telecommunication Systems", IEEE Trans., August, November 1973 pp. 1294-1301
- [61] ELNUBI, S.M., SINGH, R. and GUPTA, S.C., "A New Frequency Channel Assignment Algorithm in High Capacity Mobile Communication Systems", IEEE Trans., August 1982, pp. 125-131
- [62] SEKIGUCHI, H., ISHIKAWA, H., KOYAMA, M. and SAWAVA, H., "Techniques for Increasing Frequency Spectrum Utilisation in Mobile Radio Communication Systems", IEEE, H-2037-0/85/0000-0026, 1985, pp.2631

oooooooooooooooooooo