

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica

Simulação de Sistemas de Comunicações Móveis de Grande Porte com a Variação do Limiar de Bloqueio

Orientando

Ailton Akira Shinoda

Orientador

Michel Daoud Yacoub *OK*

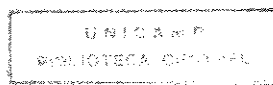
Tese apresentada na Faculdade de Engenharia Elétrica,
Departamento de Comunicações, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, Abril de 1993

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Ailton Akira Shinoda

provida pela Comissão
Juizadora em 02 04 93

Michel Daoud Yacoub
Orientador



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 propagação de rádio ser variável, tanto no espaço como no 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 de grande porte* através da simulação, onde o tráfego da fronteira entre duas células é utilizado para técnicas de *encaminhamento alternativo*. A estratégia analisada 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 os seus canais bloqueados. O momento da tomada de decisão do reroteamento 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.

Esta técnica é aplicada a um sistema *infinito* de células e a um sistema celular *real* (*finito*). A análise é feita através de *simulação de Monte Carlo*.

Agradecimentos

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) da TELEBRÁS pela oportunidade oferecida. Em especial, a Edvaldo Paro, Paulo Xavier Filho e Romualdo Barros.

À Michel Yacoub pelo apoio durante todo o período de estudos.

Aos amigos do CPqD e da UNICAMP, companheiros e incentivadores nesta jornada.

Aos meus pais.

Conteúdo

1	Introdução	3
1.1	Rádio Móvel Celular	4
1.1.1	Arquitetura Básica	5
1.1.2	Definições Básicas	8
1.1.3	Planejamento do Sistema	9
1.2	Objetivo do Trabalho	10
1.3	Plano do Trabalho	11
2	Melhoria de Desempenho do Sistema Celular	13
2.1	Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego	14
2.1.1	Modificando a Estrutura Celular	14
2.1.2	Mantendo a Estrutura Celular	16
2.2	Assinantes com Acesso a mais de uma Célula	20
2.3	Benefícios Potenciais do Encaminhamento Alternativo	22
2.4	Variação do Limiar de Bloqueio	23
3	Sistema de Pequeno Porte	27
3.1	Modelo de Tráfego	28
3.2	Parâmetros de Tráfego e Medidas de Desempenho	31
3.3	Modelo da Análise Numérica	34
3.4	Modelo de Simulação para Uma Célula	34
3.5	Modelo de Simulação para Duas Células	36

3.5.1	Modelo 1	36
3.5.2	Modelo 2	38
3.5.3	Modelo 3	39
3.6	Implementação dos Modelos de Simulação	40
3.7	Resultados	41
3.7.1	Bloqueio Médio versus Desbalanceamento	41
3.7.2	Bloqueio Médio versus Flexibilidade	44
3.7.3	Bloqueio Médio versus Tráfego	47
3.8	Conclusão	50
4	Sistema de Grande Porte	51
4.1	Modelo de Tráfego	52
4.1.1	Geração de Tráfego Móvel	53
4.1.2	Handover	55
4.1.3	Probabilidade de Bloqueio de Handover	58
4.2	Parâmetros de Tráfego e Medidas de Desempenho	61
4.2.1	Proporção do Tráfego Flexível	62
4.2.2	Desbalanceamento de Tráfego	62
4.2.3	Relações entre os Parâmetros de Tráfego e Fluxos de Tráfego	63
4.2.4	Medidas de Desempenho	63
4.3	Modelo de Sistemas de Grande Porte	64
4.3.1	Sistema Ideal (Infinito)	64
4.3.2	Sistema Real (Tóquio)	67
4.4	Simulação	69
4.5	Validação do Modelo	71
4.5.1	Tráfego de Poisson e Fórmula de Erlang-B	71
4.5.2	Alterações no Tráfego das Células Devido ao Handover	73
4.5.3	Probabilidade de Bloqueio de Handover	76
4.6	Resultados do Sistema Ideal (Infinito)	77

4.6.1	Bloqueio Médio versus Flexibilidade	78
4.6.2	Bloqueio Médio versus Tráfego	81
4.7	Resultados do Sistema Real (Tóquio)	82
4.7.1	Cálculo do Número do Conjunto de Canais	83
4.7.2	Bloqueio Médio versus Flexibilidade	86
4.7.3	Bloqueio Médio versus Tráfego	89
4.8	Conclusão	90
5	Conclusões	91
5.1	Considerações Finais	92
5.2	Trabalhos Futuros	93
A	Fluxograma para Uma Célula	95
A.1	Programa Principal	95
A.1.1	Descrição dos Blocos	96
A.2	Tráfego	96
A.2.1	Descrição das Instruções	96
A.3	Simulação	97
A.3.1	Descrição das Instruções	97
A.4	Geração de Chamadas	98
A.4.1	Descrição das instruções	98
A.5	CHAMADA	99
A.5.1	Descrição das Instruções	99
A.6	Canal	100
A.6.1	Descrição das Instruções	100
A.7	Resultado	101
A.7.1	Descrições das Instruções	101
B	Fluxograma do Modelo 1	103
B.1	Programa Principal	103

B.1.1	Descrição dos Blocos	104
B.2	Tráfego	104
B.2.1	Descrição das Instruções	105
B.3	Simulação	106
B.3.1	Descrição das Instruções	106
B.4	Geração de Chamadas Fixas	107
B.4.1	Descrição das intruções	107
B.5	Geração de Chamadas Flexível	108
B.5.1	Descrição das intruções	108
B.6	Chamada Fixa	109
B.6.1	Descrição das Instruções	110
B.7	Chamada Flexível	111
B.7.1	Descrição das Instruções	111
B.8	Canal	113
B.8.1	Descrição das Instruções	113
B.9	Resultados	114
B.9.1	Descrição das Instruções	115
C	Fluxograma do Modelo 2	117
C.1	Programa Principal	117
C.1.1	Descrição dos Blocos	118
C.2	Tráfego	118
C.2.1	Descrição das Instruções	119
C.3	Simulação	120
C.3.1	Descrição das Instruções	120
C.4	Geração de Chamadas Fixa	121
C.4.1	Descrição das intruções	121
C.5	Geração de Chamadas Flexível	122
C.5.1	Descrição das intruções	123

C.6 Chamada Fixa	124
C.6.1 Descrição das Instruções	124
C.7 Chamada Flexível	125
C.7.1 Descrição das Instruções	125
C.8 Origem da Chamada Flexível	126
C.8.1 Descrição das Instruções	127
C.9 Canal	129
C.9.1 Descrição das Instruções	129
C.10 Resultados	130
C.10.1 Descrição das Instruções	131
D Fluxograma do Modelo 3	133
D.1 Programa Principal	133
D.1.1 Descrição dos Blocos	134
D.2 Tráfego	134
D.2.1 Descrição das Instruções	135
D.3 Simulação	135
D.3.1 Descrição das Instruções	136
D.4 Geração de Chamadas	136
D.4.1 Descrição das instruções	137
D.5 Chamada	137
D.5.1 Descrição das Instruções	138
D.6 Chamada Fixa	138
D.6.1 Descrição das Instruções	139
D.7 Chamada Flexível	140
D.7.1 Descrição das Instruções	140
D.8 Canal	142
D.8.1 Descrição das Instruções	142
D.9 Resultados	144

D.9.1	Descrição das Instruções	144
-------	------------------------------------	-----

E Fluxograma do Sistema Infinito 147

E.1	Programa Principal	147
E.2	Tráfego	148
E.3	Simulação	149
E.4	Geração de Chamadas	150
E.5	Chamada	151
E.6	Chamada Fixa	152
E.7	Chamada Flexível	153
E.7.1	Variáveis e Funções	154
E.8	Canal	155
E.8.1	Variáveis e Funções	156
E.9	Resultados	157
E.9.1	Variáveis	158

F Fluxograma do Sistema de Tóquio 159

F.1	Programa Principal	159
F.2	Tráfego	160
F.3	Simulação	161
F.4	Geração de Chamadas	162
F.5	Chamada	163
F.6	Chamada Fixa	164
F.7	Chamada Flexível	165
F.7.1	Variáveis e Funções	166
F.8	Canal	167
F.8.1	Variáveis e Funções	168
F.9	Resultados	169
F.9.1	Variáveis	170

Capítulo 1

Introdução

O uso do rádio em comunicações móveis, isto é, na comunicação entre pontos não fixos sem utilização de enlaces físicos, remonta às primeiras experiências com o invento de Marconi. Ainda no final do século passado [1], Hertz demonstrou sua potencialidade ao transmitir um sinal de rádio de um ponto fixo em terra a um barco distante 18 milhas. Desde então, e principalmente a partir da Segunda Guerra Mundial, o uso do rádio móvel tem crescido continuamente. Nos dias de hoje, particularmente nas sociedades mais industrializadas do planeta, estes sistemas estão presentes em diversos setores, desde segurança e saúde públicas, comunicação com barcos e aeronaves até a comunicação individual através de equipamentos instalados em veículos ou mesmo portáteis.

Os primeiros sistemas de rádio móvel terrestre foram instalados pelos Departamentos de Polícia de Detroit, em 1921, e de Nova York, em 1932. Operando na faixa de 2 MHz [2], utilizavam comunicação unidirecional, no sentido estação fixa para estação móvel. O aumento da demanda e o desenvolvimento tecnológico estimularam o uso de frequências mais altas nas décadas seguintes. Em 1946 [1] um sistema em 150 MHz entrou em operação comercial em Saint Louis, nos EUA, permitindo comunicação *simplex*, com as chamadas encaminhadas por meio de uma operadora (“telefonista”). Em 1969 [1] um sistema *full duplex* com encaminhamento automático, operando em 450 MHz, tornou-se disponível nos EUA. Em 1974 [3] a *Federal Communications Commission* (FCC), respondendo à crescente demanda pelo serviço, reservou 40 MHz na faixa de 800–900 MHz para uso de

sistemas públicos de rádio móvel terrestre, correspondendo a quase 40 vezes a banda até então disponível.

Com as mesmas facilidades dos telefones convencionais, além da mobilidade, os sistemas públicos de rádio móvel desenvolveram-se rapidamente também em outras partes do planeta. Nos países escandinavos, por exemplo, quando o *Sistema Nórdico de Telefonia Móvel* entrou em operação em 1981, estimava-se [2] para 1991 aproximadamente 50 mil assinantes móveis na Suécia. Este número foi alcançado em 1984. Na Grã-Bretanha [2] os serviços de rádio móvel têm crescido à taxa de 10% ao ano, prevendo-se para o final do século a existência de 2 milhões de assinantes.

Este crescimento significativo e, em alguns casos, surpreendente observado até agora deve continuar nas próximas décadas com os novos conceitos de comunicação pessoal em fase de concepção, para os quais imaginam-se as mesmas facilidades oferecidas pela telefonia convencional, além da mobilidade e portabilidade do aparelho de comunicação, onde a estação móvel estará associada exclusivamente ao indivíduo.

1.1 Rádio Móvel Celular

Um sistema de rádio móvel terrestre é constituído basicamente por terminais móveis (*Estação Rádio Móvel* ou simplesmente *Estação Móvel*), por uma central de comutação (*Central de Comutação Móvel*) e por uma estação fixa (*Estação Rádio Base* ou simplesmente *Estação Base*). Enlaces de rádio ligam as Estações Móveis à Estação Base, e esta, por sua vez, conecta-se, geralmente por meio de fios, à Central de Comutação Móvel.

Nos primeiros sistemas, os *Sistemas Móveis Convencionais*, geralmente uma única Estação Base era instalada para cobrir toda a área onde desejava-se instalar o serviço. Suas antenas eram colocadas suficientemente altas para que toda a região pudesse ser iluminada e, em geral, tinham transmissores com potência elevada. Diversos fatores contribuíram para que este modelo fosse abandonado para sistemas públicos de rádio móvel. Entre eles podemos citar [4]:

- a grande separação geralmente necessária entre as Estações Bases para permitir a

reutilização das frequências, sabendo-se que o espectro é um recurso escasso e que deve ser usado com a maior eficiência possível;

- a impossibilidade de, a partir de um único ponto elevado, moldar a área de cobertura de acordo com as reais necessidade do serviço;
- a incompatibilidade existente entre a demanda por serviços e a faixa de frequências disponível para atendê-la, o que exigia novas técnicas de cobertura que preservassem o espectro;
- o barateamento dos equipamentos de rádio, o que possibilitou a implementação de Estações Bases e Estações Móveis a um custo mais baixo;
- o surgimento das Centrais de Comutação Temporal (CPA-T), que facilitaram o controle e a gerência da alocação dos canais e das chamadas.

O sistema que emergiu a partir destas necessidades foi denominado *Sistema Móvel Celular*. Seu funcionamento baseia-se na divisão de uma dada região geográfica em sub-regiões, chamadas *células*, com cada célula sendo atendida por uma Estação Base. Um grupo de células forma um *cluster*, onde todos os canais disponíveis podem ser utilizados. O sistema permite ao assinante móvel completo acesso às redes telefônicas fixa e móvel, assim como, através de um sistema de busca, o assinante móvel pode ser localizado para receber uma chamada tanto de assinantes fixos como móveis. Além disso se, durante a chamada, o assinante desloca-se de uma célula para outra, o sistema encarrega-se de efetuar, automaticamente, a mudança do enlace rádio da conexão para a nova célula (este processo é conhecido como *Handoff* ou *Handover*).

1.1.1 Arquitetura Básica

A estrutura básica do Sistema Móvel Celular [7], apresentado na Figura 1.1, engloba, em geral, as seguintes partes: Centro de Operação e Manutenção, Centro de Controle e Comutação, Estação Base e Estação Móvel.

Centro de Operação e Manutenção

O Centro de Operação e Manutenção é um ponto centralizado de gerência de vários Centros de Controle e Comutação. Sua principais funções são [5]:

- Manter bases de dados da configuração do sistema e dos assinantes presentes em sua área de atuação. Parte destas informações estão presentes também nos Centros de Controle e Comutação.
- Coletar e processar dados estatísticos do tráfego, da disponibilidade do sistema, entre outros. Em geral, processa também tarifação das chamadas a partir dos dados enviados pelos Centros de Controle e Comutação.
- Servir como ponto centralizado de operação e manutenção, permitindo alterações na configuração do sistema, além de receber, entre outras, as indicações de alarmes.

Centro de Controle e Comutação

O Centro de Controle e Comutação é o elo de ligação entre as várias Estações Bases a ele subordinadas e a rede telefônica pública. Suas principais funções são [5]:

- Alocar e gerenciar os canais (voz e controle) das Estações Bases a ele conectadas.
- Outras tarefas relativas ao estabelecimento da chamada como, por exemplo, analisar e validar os dígitos recebidos, coletar dados para tarifação e comutar os circuitos de voz para o conveniente encaminhamento das chamadas.
- Validar os assinantes, ou seja, verificar a autorização para acesso ao sistema.
- Coletar dados, entre outros, para as estatísticas do sistema.

Estação Base

A Estação Base é o último ponto fixo da rede, a partir do qual enlaces de rádio permitem aos assinantes móveis o acesso ao sistema. Suas principais funções são [5]:

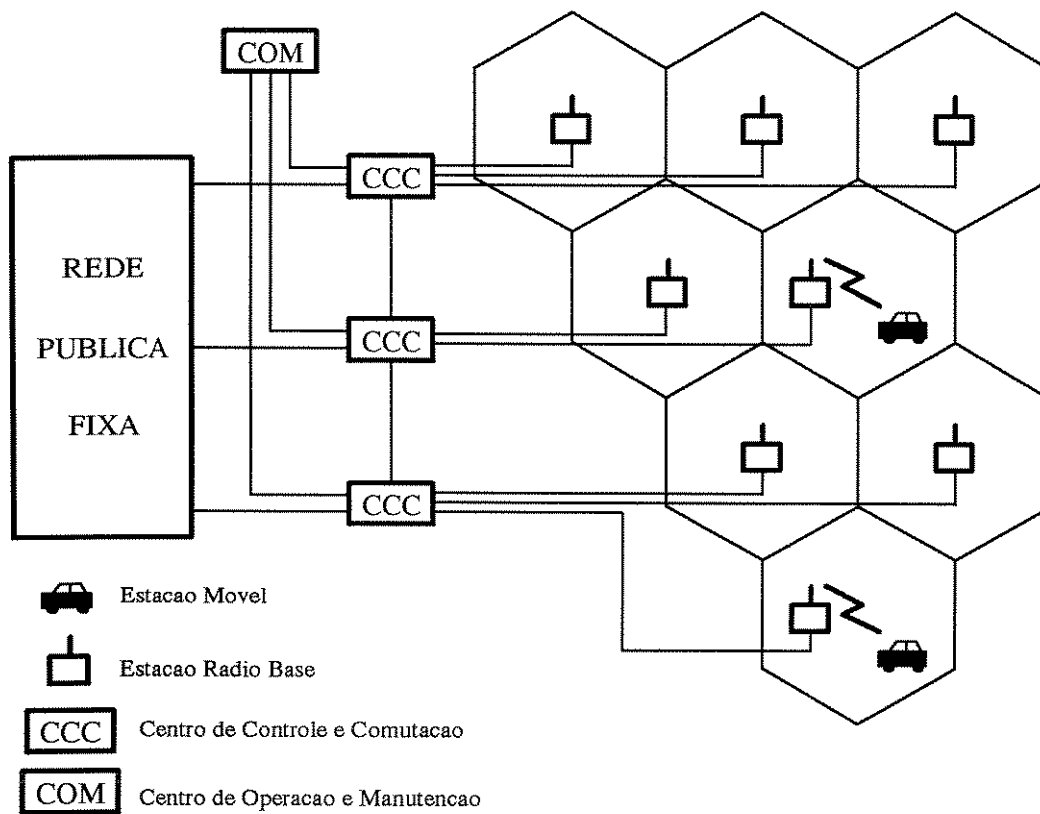


Figura 1.1: Arquitetura Básica do Sistema Móvel Celular.

- Transmitir e receber os sinais de rádio (voz e controle) para e das Estações Móveis.
- Monitorar os canais de voz em uso, avaliando sua integridade.
- Trocar sinalização com os assinantes móveis para, entre outros, estabelecimento, manutenção e desligamento das chamadas.

Estação Móvel

A Estação Móvel é o equipamento rádio telefônico dos assinantes. Pode ser do tipo *veicular* (instalada em um veículo), *transportável* (instalada em um veículo, mas podendo ser removida para operação externa), *portátil* e, eventualmente, *fixa*. Suas principais funções são [5]:

- Transmitir e receber os sinais de rádio (voz e controle) para e da Estação Base.
- Trocar sinalização com a Estação Base para estabelecimento, manutenção e desligamento das chamadas.
- Prover a interface eletro-acústica.

1.1.2 Definições Básicas

Alguns dos principais conceitos em sistemas de telefonia móvel celular são apresentados a seguir.

Célula

É a área coberta por uma Estação Base e corresponde a uma região de identificação específica no sistema. Usualmente, as células têm raio entre 1 e 20 km, sendo esta dimensão influenciada, entre outros, pela frequência de propagação utilizada e pelo relevo da região. Além disso, o tráfego estimado é fator importante na definição do tamanho da célula. Por exemplo, áreas com maior densidade populacional, como centros de cidades, e portanto, com maior demanda pelo serviço, requerem células menores.

Área de Controle

Corresponde à área coberta por um Centro de Controle e Comutação e que inclui, em geral, várias células, podendo incluir também vários *clusters* [6].

Área de Serviço

Corresponde à área onde a Estação Móvel tem acesso ao serviço móvel celular [6].

Área de Localização

Corresponde ao conjunto de células onde a Estação Móvel pode mover-se livremente sem necessidade de atualização de seu registro de localização [6]. No caso de uma chamada

destinada a um assinante móvel, o sistema procede sua busca a partir das informações contidas em seu registro e localização.

Handover

É o processo de comutação de uma chamada em andamento de uma célula para outra, o que ocorre com o deslocamento do móvel pela Área de Serviço [6]. O termo *handoff* é também largamente empregado.

Estação Móvel Visitante¹

Denomina-se Estação Móvel Visitante [6] àquela que requer acesso ao sistema em uma área diferente daquela em que está registrada. Através do uso de uma rede de dados que possibilite a comunicação entre os Centro de Operação e Manutenção envolvidos, ou, em outros casos, através da intervenção de uma operadora, o usuário obtém ou não permissão para realizar as chamadas.

1.1.3 Planejamento do Sistema

A instalação do serviço de rádio móvel envolve uma série de definições e estudos. Alguns aspectos como faixa de frequências utilizada, plano de tarifação, método de identificação e validação dos usuários, arquitetura e protocolos do sistema, entre outros, são normalmente pré-definidos ou pelos organismos regulatórios, ou pelas operadoras do serviço, ou pelos fabricantes ou ainda por todos eles. Entretanto, a implantação do sistema envolve também outros aspectos intimamente relacionados à área onde o serviço estará disponível.

O planejamento do sistema geralmente inicia-se com estudos e projeções do volume e do perfil do tráfego rádio-telefônico [5]. Estes dados são utilizados na definição da capacidade do sistema, isto é, na determinação do número de canais de voz necessários nas diversas partes da Área de Serviço, e como esta capacidade deve alterar-se para satisfazer

¹O termo em inglês *roamer* é também largamente empregado.

a demanda futura. Estes dados também são utilizados para uma primeira avaliação do número e do tamanho das células.

Em seguida, um detalhado estudo das características de rádio propagação da área é geralmente realizado. Este estudo é utilizado para o posicionamento das Estações Bases e envolve dados detalhados do relevo, obstruções e vegetação presentes, entre outros. Em alguns casos, um elaborado modelo computacional é envolvido na estimativa da propagação do sinal e, portanto, na determinação da área de cobertura das Estações Bases. Com as células definidas e as Estações Bases posicionadas, realiza-se em seguida a alocação dos canais, tendo-se em mente não apenas a situação inicial do sistema, mas considerando-se também seu crescimento futuro.

Finalmente, os equipamentos são escolhidos. Evidentemente, aspectos econômicos e, eventualmente, políticos, podem influenciar o planejamento do sistema. A indisponibilidade de locais adequados para instalações das antenas, o custo dos equipamentos, a inexistência de facilidades na rede, entre outros, realimentam o processo de planejamento.

1.2 Objetivo do Trabalho

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 rádio base.

O objetivo deste trabalho é o estudo do desempenho do tráfego de um sistema de rádio móvel celular, onde o tráfego da fronteira entre células é utilizado para técnicas de encaminhamento alternativo. A estratégia analisada baseia-se na **Variação do Limiar de Bloqueio** [8] 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. O momento da tomada de decisão 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.

Em [8] esta técnica foi explorada levando-se em conta apenas duas células. Propõe-se neste trabalho a expansão desta técnica para um sistema infinito de células, onde diferentes condições serão testadas. Pretende-se ainda aplicar esta técnica em sistemas reais com número finito de células. De fato, serão utilizadas diferentes distribuições de tráfego, diferentes números de canais por célula, etc. Além disso será verificado o efeito do processo do handover e de outros fatores presentes no sistema móvel celular.

Devido a que esta abordagem torna o problema analiticamente intratável, a simulação de *Monte Carlo* será o instrumento utilizado para a avaliação do desempenho do sistema.

1.3 Plano do Trabalho

O capítulo 2 apresenta as técnicas que tem como objetivo melhorar o desempenho do sistema celular.

O capítulo 3 apresenta uma comparação entre a simulação e a análise numérica [8] de um sistema de duas células.

O capítulo 4 apresenta os modelos e resultados da simulação da **Variação do Limiar de Bloqueio** de dois sistemas de grande porte: *infinito* e *real*.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos nessa área.

Capítulo 2

Melhoria de Desempenho do Sistema Celular

O sistema de rádio móvel celular divide a região geográfica em células, sendo cada célula servida por uma estação base. Um grupo de células forma um cluster, onde todos os canais podem ser utilizados. Com isto as frequências utilizadas em uma célula podem ser repetidas em outras, dentro de determinadas regras para diminuir os efeitos da interferência. Como a densidade de telefones móveis é muito variável entre o centro das cidades e a periferia, à dimensão das células combina-se a quantidade de canais da estação base para atender a demanda de tráfego.

Em função da demanda de tráfego foram propostas técnicas visando melhorar o desempenho, tendo como parâmetros a quantidade de células e a alocação de canais. Estas técnicas são descritas na seção 2.1.

Muitos aspectos de projetos de rádio móvel celular são estudados considerando as fronteiras entre as células como fixas. Na realidade as fronteiras não são bem definidas e mudam devido a propagação de rádio ser variável. Este fato é analisado nas seções 2.2 e 2.3.

As fronteiras que não estão bem definidas são utilizadas como alternativa para o escoamento de tráfego. O modo como isto é feito está na seção 2.4.

2.1 Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego

A telefonia móvel é o segmento de maior crescimento do setor das telecomunicações. A procura por este serviço aumenta a cada dia e, com o objetivo de atender esta demanda crescente, várias técnicas que melhoram o desempenho dos sistemas têm sido propostas. Estas técnicas podem ou não envolver modificações na estrutura celular do sistema. Algumas delas serão descritas a seguir.

2.1.1 Modificando a Estrutura Celular

Neste ítem podem-se citar modificação de padrão celular, divisão de células (*cell splitting*) e setorização.

a - Modificação do Padrão Celular

O objetivo desta técnica é diminuir o número de células por cluster, aumentando-se, assim, o número de canais por célula e, conseqüentemente, o tráfego escoado. Por exemplo, ao invés de se utilizar um padrão de 12 células por cluster, utilizar-se-ia um de 7 células por cluster.

b - Divisão de Células

Seguindo o mesmo princípio que propiciou a transição de sistemas convencionais para o sistema celular, ou seja, a divisão de grandes áreas de cobertura em pequenas áreas ou células, continuou-se 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 Figura 2.1 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, porém existem alguns problemas que surgem na divisão, e que devem ser levados em consideração [9, 10]:

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

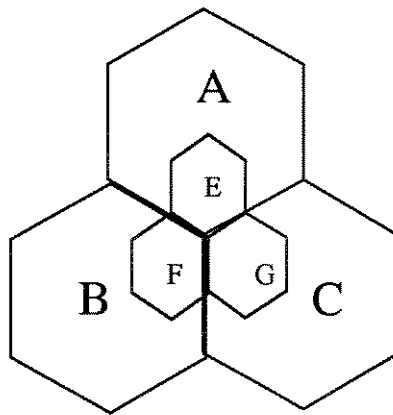


Figura 2.1: Exemplo de divisão de células

c - Setorização

A setorização com o uso de antenas direcionais é uma alternativa para a técnica de divisão de células, pois tem a vantagem de reduzir os custos, evitando a instalação de novas estações base [4] e também a interferência de cocanal [11]. O método consiste em dividir a célula em setores, onde cada setor pode ser considerado uma nova célula. Células com três ou seis setores são as mais utilizadas. A Figura 2.2 ilustra um arranjo de três setores dentro de uma célula, o que equivale a divisão de uma célula em três novas células.

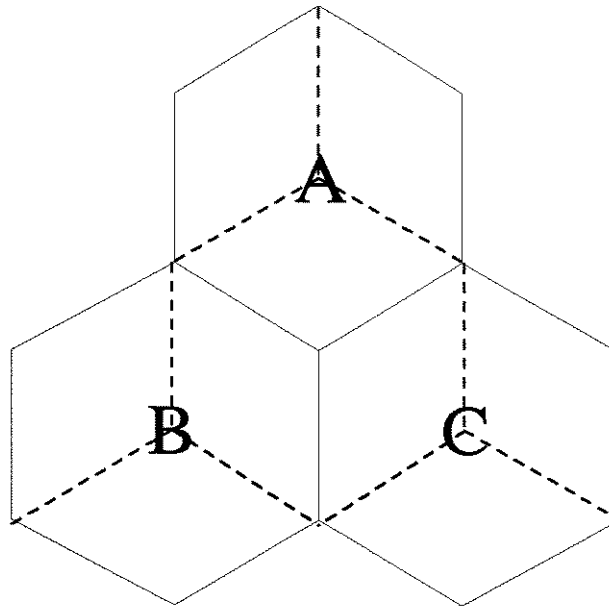


Figura 2.2: Exemplo de setorização

2.1.2 Mantendo a Estrutura Celular

As técnicas deste grupo são principalmente aquelas envolvendo algoritmo de alocação de canais. Estes algoritmos podem ter um carácter *global* ou simplesmente *local*.

O primeiro caso implica o envolvimento de um processamento centralizado onde a alocação de canais é feita levando-se em conta o perfil de tráfego de todo o sistema celular. O padrão de uso dos canais é, certamente, modificado. No segundo caso as decisões são locais e envolvem grupos de duas ou no máximo três células vizinhas, sendo que o padrão de uso dos canais não se altera.

a - Técnicas de Carácter Global

O eficiente uso dos canais determina um bom desempenho de qualquer sistema, e pode ser obtido por diferentes técnicas de alocação de canais [9, 10]. Algumas destas são descritas a seguir.

- (i) **Alocação Fixa de Canais:** um número fixo de canais do sistema é alocado a cada célula. Estes mesmos canais são alocados a outras células, respeitando-se a distância mínima de reuso para evitar 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 do tráfego pode causar distúrbios no sistema.
- (ii) **Alocação Dinâmica de Canais:** todos os canais do sistema 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 [12].
- (iii) **Alocação Híbrida de Canais:** 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/dinâmicos.
- (iv) **Alocação de Canais por Empréstimo:** uma célula que tenha todos os seus canais ocupados procura um canal livre da célula vizinha; caso não haja canais disponíveis a chamada é bloqueada. Por outro lado, é possível desencadear um processo de empréstimo *forçado* onde uma célula distante acaba cedendo seu canal para uma célula vizinha e esta para a próxima, e assim por diante, até que a célula necessitada acabe de ser servida.

A implementação de qualquer das técnicas de alocação de canais mencionadas, 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 localizam-se no processamento, que dependem do comportamento do sistema como um todo. As dificuldades diminuiriam

se as decisões fossem tomadas não de maneira centralizada, mas dentro de cada área e definindo qual tipo de tráfego ou chamadas seriam plausíveis de tratamento especial.

b - Técnicas de Carácter Local

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 [13]. A Figura 2.3 mostra uma área de cobertura hipotética para um sistema de rádio móvel celular, onde é comparada com a área hexagonal ideal. Na Figura 2.3 observa-se que existem áreas superpostas. Se uma estação móvel encontra-se nessa área poderá ter boa comunicação com mais de uma estação base.

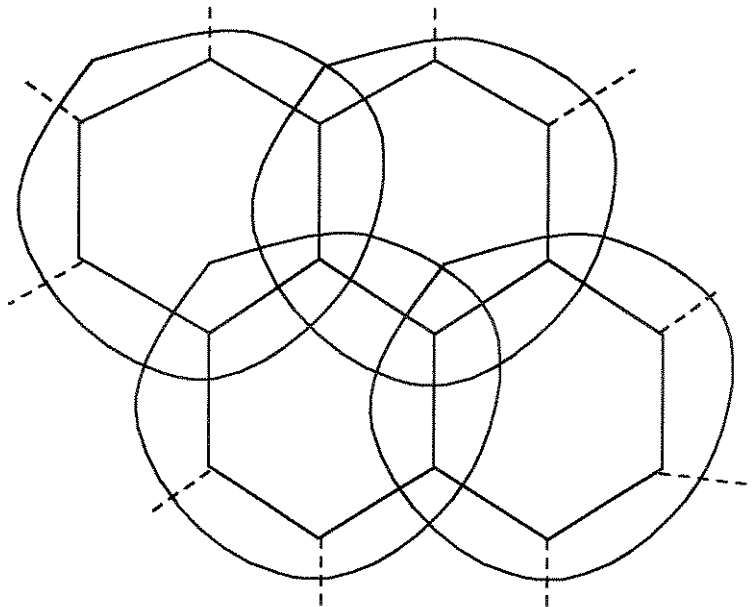


Figura 2.3: Área de cobertura hipotética

Este fato é amplamente utilizado pelas técnicas de encaminhamento alternativo e algumas delas são descritas a seguir [10, 8].

(i) **Mean Adaptation (MAP)**: baseia-se nas estimativas do tráfego médio sem o conhecimento das condições de bloqueio das células [9, 10]. O tráfego flexível é dividido entre as células em função do desbalanceamento do tráfego médio. Duas situações podem ocorrer:

1. **Balanceamento** - este é o caso quando o tráfego flexível nas áreas superpostas é suficiente para compensar o desbalanceamento entre as células.
2. **Desbalanceamento reduzido** - não existe tráfego flexível suficiente para o balanceamento do sistema, entretanto o desbalanceamento do tráfego pode ser reduzido se houver uma redistribuição apropriado do tráfego flexível.

O objetivo desta técnica é alcançar o estado de balanceamento. Quando isto é atingido a técnica deixa de ser utilizada. Entretanto desde que as estimativas de tráfego médio são realizadas em intervalos discretos de tempo, o estado de balanceamento pode sofrer distúrbios quando uma célula gera mais ou menos tráfego do que outra. Por isso uma nova redistribuição do tráfego flexível tem que ser planejado para o próximo intervalo.

(ii) **Adaptative Response to Blocking (ARB) ou Directed Retry**: baseia-se no conhecimento das condições de bloqueio das células [9, 10]. As chamadas identificadas como flexíveis em uma célula são encaminhadas às células vizinhas na ocorrência de bloqueio de sua própria célula.

(iii) **Adaptation to Mean and Blocking (AMB)**: baseia-se na combinação de MAP e ARB, ou seja, as condições do tráfego médio e de bloqueio das células são conhecidas [9, 10]. Todas as considerações sobre o MAP são aplicadas para o AMB. A diferença entre os dois é que no AMB as chamadas bloqueadas em uma célula podem ser desviadas para outras células vizinhas.

(iv) **Instantaneous Adaptation (IAP)**: baseia-se no conhecimento instantâneo do estado do tráfego, ou seja, no número de canais ocupados das células em cada instante

[9, 10]. As chamadas flexíveis são identificadas imediatamente e o objetivo é direcionar estas chamadas preferencialmente para a célula com mais canais livres. Quando as células possuem o mesmo número de canais livres, o tráfego flexível é dividido igualmente entre elas.

- (v) **Instantaneous and Mean Adaptation (IMA):** baseia-se no conhecimento do número de canais ocupados das células em cada instante e o tráfego médio [9, 10]. As decisões são as mesmas da técnica IAP, exceto nos casos onde as células possuem o mesmo número de canais livres. Nestes casos o procedimento é direcionar o tráfego flexível para a célula menos carregada.
- (vi) **Variação do Limiar de Bloqueio:** esta técnica [8] é objeto de estudo deste trabalho e será detalhada na seção 2.4.

2.2 Assinantes com Acesso a mais de uma Célula

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

Se uma estação móvel encontra-se 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 técnicas de encaminhamento alternativo é estimar a proporção de tráfego flexível no sistema.

Como já foi mencionado anteriormente, a forma hexagonal das células em um sistema de telefonia móvel é um modelo ideal. Utilizando-se antenas omnidirecionais, a área de cobertura aproxima-se ao formato de um círculo. Consequentemente, existe uma intersecção natural destas áreas servidas por estações bases vizinhas e isto está representada pela região hachurada da Figura 2.4.

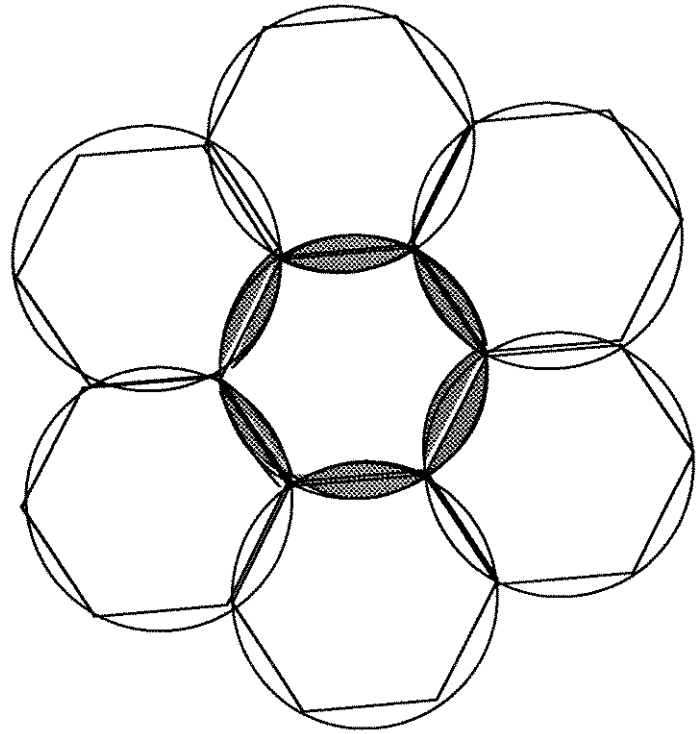


Figura 2.4: Intersecção das áreas de cobertura

Define-se γ como sendo a área de intersecção com seis estações base tomadas duas a duas:

- $\gamma = \text{Área de intersecção (hachurada)} / \text{Área total da célula}$

Atráves de cálculos simples [9, 10] constata-se que γ é de aproximadamente 21%. Assumindo que as estações móveis estão distribuídas uniformemente dentro das células, pode-se afirmar que 21% dos assinantes estão dentro das fronteiras não definidas, podendo ser atendidos por ambas as estações bases.

Além da intersecção devido a variação da propagação de rádio, existe a preocupação nos projetos de sistemas de telefonia móvel para que haja uma região de intersecção natural para permitir que o handover seja feito de forma a não prejudicar a conexão

estabelecida [9, 10]. Isto permite uma adaptabilidade no caso da condição de handover não ser realizada imediatamente, seja porque não existam canais livres, ou porque uma outra tarefa de maior prioridade esteja sendo executada no momento do handover ser requisitado.

2.3 Benefícios Potenciais do Encaminhamento Alternativo

Para se ter uma idéia dos benefícios potenciais do encaminhamento alternativo considere dois casos extremos:

- (a) Fronteiras sem intersecção ($\gamma = 0$), ou seja, as células estão completamente isoladas umas das outras, i.é., tão logo a estação móvel cruza a fronteira é realizado o handover (Figura 2.5a).
- (b) Células com intersecção total ($\gamma = 1$), ou seja, as duas células podem ser consideradas como uma só, onde as estações móveis podem ter acesso a todos os canais das duas células, com a condição de que o estado de bloqueio das células seja conhecido (Figura 2.5b).

Na Figura 2.5 $A1$, $N1$ e $A2$, $N2$ são o tráfego e o número de canais das células 1 e 2 respectivamente. Calculando-se o bloqueio médio do sistema temos :

$$B_{ma} = \frac{A1 E(A1, N1) + A2 E(A2, N2)}{A1 + A2} \quad (2.1)$$

$$B_{mb} = E(A1 + A2, N1 + N2) \quad (2.2)$$

onde $E(A, N)$ é a fórmula de *Erlang-B*.

Pode-se ver que $B_{mb} < B_{ma}$ para $A1$, $N1$ ou $A2$, $N2$ diferentes de zero. Como exemplo, se $A1 = 4$ erl, $N1 = 5$ canais, $A2 = 1$ erl e $N2 = 5$ canais temos:

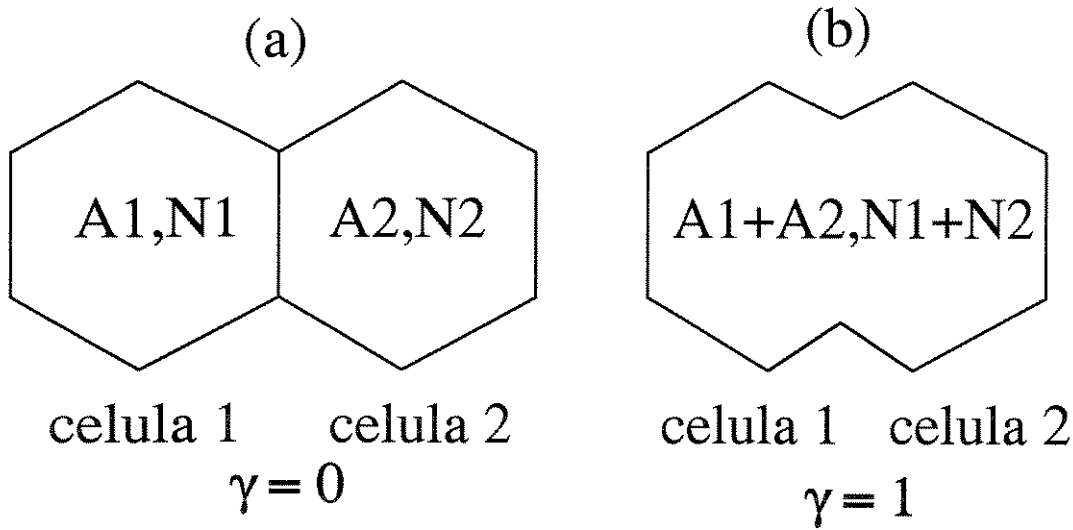
(a) $Bma = 16\%$ (b) $Bmb = 1.8\%$ 

Figura 2.5: Casos extremos de fronteiras não definidas

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

2.4 Variação do Limiar de Bloqueio

As fronteiras entre as células não são bem definidas, e suas áreas de cobertura sobrepõem-se em alguns pontos, permitindo o surgimento de tráfego flexível. Deste modo o tráfego oferecido ao sistema pode ser dividido em três tipos:

- Tráfego fixo da célula 1 ($A1$).
- Tráfego fixo da célula 2 ($A2$).

- Tráfego alternativo ou flexível (A12).

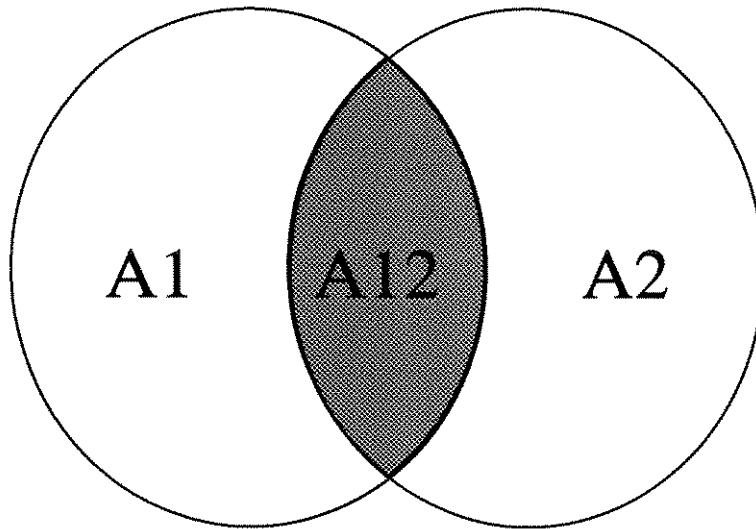


Figura 2.6: Tipos de tráfego

O tráfego fixo é gerado pelas estações móveis que têm boa comunicação somente com a estação base na qual se encontram localizadas no momento do início de uma chamada.

O tráfego alternativo é gerado pelas estações móveis que têm boa comunicação com as duas células (estações base), 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.

Esta técnica tanto quanto a *Directed Retry*, divide as células com as quais as estações móveis situadas na região de tráfego flexível podem comunicar-se, em duas categorias:

1. Célula de primeira opção : é a própria célula da estação móvel 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.

Na técnica de *Directed Retry* a célula de segunda opção é tentada apenas no caso em que a célula de primeira opção estiver bloqueada (todos os canais ocupados).

Suponha agora que a célula de segunda opção possa ser tentada antes que a de primeira opção esteja bloqueada. O objetivo é evitar o bloqueio utilizando-se os recursos disponíveis (no caso, a célula de segunda opção). Considere cada célula do sistema com N canais. Define-se L ($0 \leq L \leq N+1$) como o limiar de bloqueio com que cada célula operará. Por conveniência adota-se 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 escolhida para escoar este tráfego flexível, caso apresente um número de canais ocupados inferior ao limiar de bloqueio estabelecido. Do contrário, a chamada deverá permanecer na célula de origem.

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

Para $L = N$ 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.

Variando-se L de $N+1$ até zero pode-se 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.

A aplicação da técnica **Variação do Limiar de Bloqueio** melhora substancialmente o desempenho de tráfego do sistema [8] como será visto nos capítulos subsequentes. Além de levar o sistema a uma condição de balanceamento ou próximo deste, as chamadas originadas do tráfego fixo poderão sofrer menor bloqueio. Isto é possível caso haja um rearranjo das chamadas em andamento que tenham a condição de flexíveis aumentando-se a disponibilidade de canais livres para as chamadas da região de tráfego fixo.

Capítulo 3

Sistema de Pequeno Porte

Neste capítulo são analisados os aspectos qualitativos dos fenômenos envolvidos num sistema de pequeno porte relativamente à técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio**, onde assume-se um sistema celular de duas células. O objetivo é introduzir um modelo de simulação que deverá ser validado por uma análise numérica desenvolvida na referência [8]. Os resultados obtidos servirão como subsídios para o próximo capítulo para a elaboração de modelos e simulações de sistemas de grande porte.

O modelo de tráfego é analisado na Seção 3.1 de maneira simplificada mas adequado para esta fase. O modelo baseia-se no processo de *Markov* com algumas suposições restritivas porém válidas.

Parâmetros de tráfego e medidas de desempenho são definidos na Seção 3.2. Estes parâmetros são importantes na caracterização do sistema e as medidas de desempenho são usadas para a avaliação do sistema em função dos parâmetros e em função de outras técnicas que possam ser utilizadas.

A Seção 3.3 oferece uma noção da implementação do modelo da análise numérica para sistemas de pequeno porte. A análise numérica será o instrumento da validação dos modelos de simulação para este capítulo.

A Seção 3.4 analisa o modelo de simulação para uma célula. A simulação deste caso constitui a base para a simulação de sistemas maiores.

A Seção 3.5 apresenta três modelos de simulação para sistemas de pequeno porte. A

diferença entre eles está na quantidade de fontes de tráfego no sistema.

A Seção 3.6 descreve a implementação dos modelos de simulação.

A Seção 3.7 analisa o desempenho do sistema de rádio móvel celular, ao se aplicar a técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio**, comparando os resultados obtidos do modelo da *análise numérica* com os da *simulação*.

A Seção 3.8 comenta os resultados obtidos da simulação dos três modelos para sistemas de pequeno porte.

3.1 Modelo de Tráfego

Considere uma área de serviço móvel celular, conectada à rede fixa, com um grande número de assinantes móveis. Considere o processo estocástico de ocupação de canais do sistema móvel devido à chegada de dois tipos de chamadas: fixa-para-móvel e móvel-para-fixa. Considere que a chegada aleatória de tais chamadas em uma célula ocorre como processos de *Poisson* com as seguintes características mostradas na Tabela 3.1.

Tipo de chamada	Taxa de chegada
Fixa para móvel	λ_{FM}
Móvel para fixa	λ_{MF}

Tabela 3.1: Taxas de chamada em uma célula

Suponha que, para os dois tipos de tráfego, os tempos médios de duração de chamada, h_{FM} e h_{MF} , sejam idênticos e exponencialmente distribuídos, isto é:

$$h = h_{MF} = h_{FM} \quad (3.1)$$

Chamadas móveis para fixas ou fixas para móveis requerem um canal bidirecional. O tráfego total é um processo de *nascimento e morte* com as seguintes características:

$$\text{Tráfego Total na Célula} \triangleq A_c = \lambda h = a_{FM} + a_{MF} = \lambda_{FM} h_{FM} + \lambda_{MF} h_{MF} \quad (3.2)$$

Então existe um tempo médio de duração da chamada h e uma taxa equivalente de chegadas de ocupação do canal λ para o sistema.

Note que, neste modelo, as chamadas de assinantes móveis para assinantes móveis em uma mesma célula foram consideradas desprezíveis. De fato, esta é uma aproximação bastante razoável, uma vez que as células representam regiões geográficas, em geral, pequenas o que reduz a probabilidade de requisição simultânea de dois canais de voz em uma mesma célula.

As Figuras 3.1 e 3.2 mostram o modelo básico do tráfego do sistema móvel [14]. A linha vertical cheia e os blocos ligados a ela indicam ações que ocorrem em cada das seguintes partes envolvidas no sistema móvel:

- Centro de Controle e Comutação (CCC) que centraliza o controle de alocação de canal
- Estação Base (EB) que interfaceia o CCC e as estações móveis
- Estações Móveis (EM)

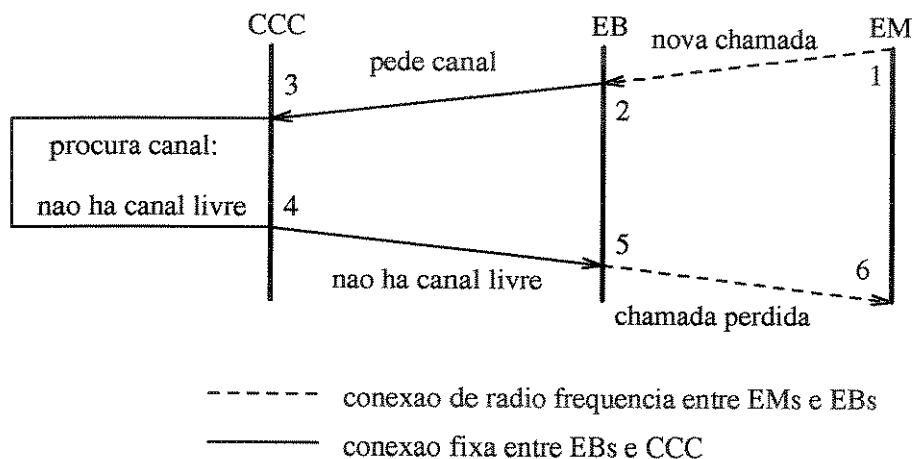


Figura 3.1: Bloqueio de nova chamada

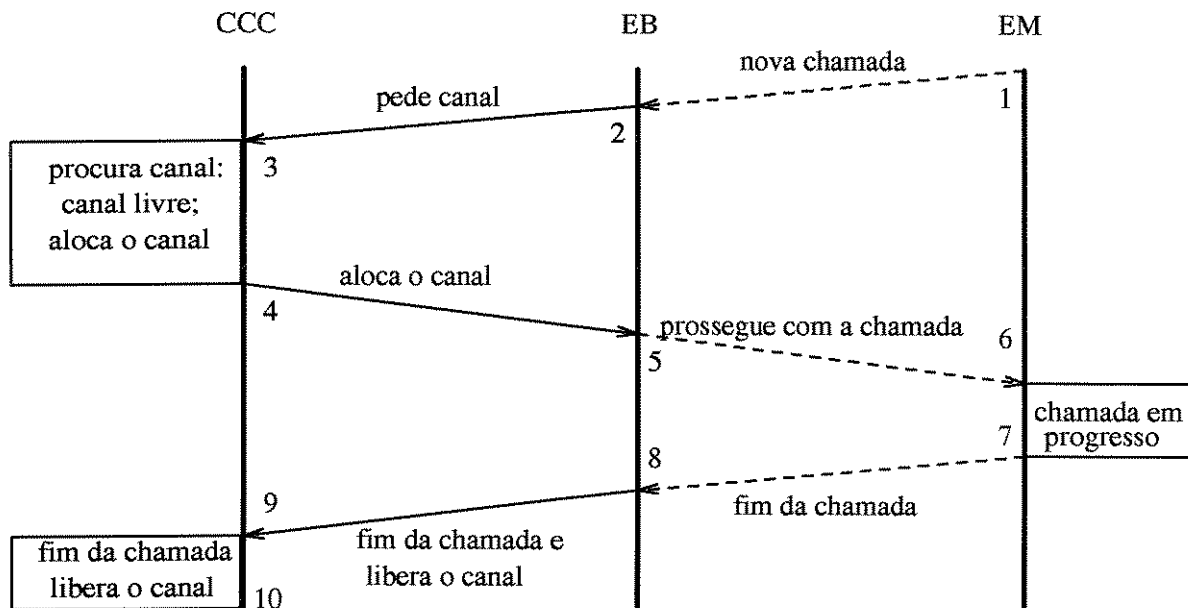


Figura 3.2: Chamada com sucesso

Ainda nas Figuras 3.1 e 3.2 as linhas diagonais indicam mensagens entre as partes envolvidas. As linhas tracejadas representam canais de rádio entre EMs e EBs, e as linhas cheias qualquer tipo de conexão fixa entre EBs e CCC. Eventos acontecem em sequência em instantes numerados 1, 2, 3, etc. A separação vertical não é uma escala de tempo.

Embora as chamadas sejam originadas no lado da rede fixa e no lado móvel, somente as chamadas geradas na parte móvel estão descritas.

A construção do modelo de tráfego é iniciado considerando as chamadas bloqueadas como perdidas. Na Figura 3.1 a EB requisita um canal para uma nova chamada, mas não há canal disponível no CCC e a chamada é perdida. Na Figura 3.2 a procura por um canal para a nova chamada é bem sucedida. A conexão com a rede fixa é estabelecida entre os passos 3 e 4. O tempo entre 6 e 7 é dado pela distribuição exponencial da duração da chamada.

O tráfego gerado em cada célula pode ser considerado como processo de *Poisson* para chegada de chamadas e distribuição exponencial negativa para duração de chamadas.

3.2 Parâmetros de Tráfego e Medidas de Desempenho

Os parâmetros aqui definidos referem-se aos que serão utilizados para a análise da técnica **Varição do Limiar de Bloqueio**. Recorde-se que, nesta técnica, o tráfego da fronteira entre células com acesso a mais de uma célula será utilizado para encaminhamento alternativo de acordo com o algoritmo descrito na Seção 2.4. É importante ressaltar que o sistema de pequeno porte aqui analisado contém duas células. Assim os parâmetros de tráfego são:

- Tráfego total oferecido ao sistema: tráfego (A).
- Proporção de tráfego flexível: flexibilidade (γ).
- Desbalanceamento entre as células: desbalanceamento (β).
- Limiar de bloqueio: limiar (L).
- Número de canais por célula: canal (N).

Nos sistemas de pequeno porte assumem-se, por conveniência, células de mesma capacidade, isto é, número de canais na célula 1 igual a número de canais na célula 2. A seguir são definidos os cinco parâmetros mencionados anteriormente.

Tráfego: Como foi visto no capítulo anterior, um certo número de estações móveis pode ter boa comunicação com mais de uma estação rádio base. Deste modo considera-se que em um sistema com duas células contíguas podem existir três tipos de tráfego:

- tráfego que tem boa comunicação unicamente com a célula 1 ($A1$);
- tráfego que tem boa comunicação unicamente com a célula 2 ($A2$);

- tráfego que tem boa comunicação com ambas as células ($A12$).

Assim o tráfego total do sistema A é definido por três variáveis:

$$A \triangleq A1 + A2 + A12 \quad (3.3)$$

Flexibilidade (γ): Indica a parcela do tráfego com acesso às duas células, e é definida da seguinte forma:

$$\gamma \triangleq \frac{A12}{A} \quad (3.4)$$

Obviamente $0 \leq \gamma \leq 1$. Se $\gamma = 0$ significa que não existe tráfego flexível e as células são consideradas isoladas uma da outra. Caso $\gamma = 1$ todo o tráfego é visto como flexível e as duas células como uma única.

Desbalanceamento (β): Indica a diferença relativa de carga de tráfego médio existente entre as células, e é definido como

$$\beta \triangleq \frac{A1 - A2}{A1 + A2} \quad (3.5)$$

com $-1 \leq \beta \leq 1$. A explanação que se segue é trivial, mas interessante para tomar-se familiaridade com β .

- $\beta = 1$ implica todo o tráfego sendo oferecido à célula 1 (desbalanceamento completo);
- $\beta = 0$ implica as duas 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 pode ser feita apenas na faixa $0 \leq \beta \leq 1$ ou $-1 \leq \beta \leq 0$.

Limiar (L): Indica o ponto a partir do qual a célula de primeira opção com L canais ocupados deverá ser evitada, cedendo lugar à tentativa da célula de segunda opção. Define-se L , tal que:

$$0 \leq L \leq N + 1$$

onde N é o número de canais por célula.

Canal (N): Indica a capacidade de cada célula, isto é, o número de canais por célula. Obviamente

$$N > 0$$

Definidos estes parâmetros (A, γ, β) , podem-se escrever os três fluxos de tráfego do sistema de pequeno porte da seguinte forma:

$$A1 = \frac{A (1 - \gamma) (1 + \beta)}{2} \quad (3.6)$$

$$A2 = \frac{A (1 - \gamma) (1 - \beta)}{2} \quad (3.7)$$

$$A12 = \gamma A \quad (3.8)$$

O desempenho do sistema é 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:

B1: probabilidade de bloqueio do tráfego $A1$;

B2: probabilidade de bloqueio do tráfego $A2$;

B12: probabilidade de bloqueio do tráfego $A12$.

Deste modo a medida de desempenho do sistema é dada pela probabilidade de bloqueio médio (Bm), que é uma média geométrica dos três tipos de probabilidade:

$$Bm = \frac{A1 B1 + A2 B2 + A12 B12}{A} \quad (3.9)$$

3.3 Modelo da Análise Numérica

Num sistema de pequeno porte (2 células) 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 entenderem os fenômenos que se esperam de um sistema maior, pois fornecem uma idéia qualitativa do desempenho do sistema. Com a escolha de um sistema de duas células é possível explorar o sistema através da análise numérica, com a manipulação de todos os parâmetros dentro da faixa de variação possível dos mesmos.

A análise de sistemas maiores é muito complicada se forem levadas em consideração todos os fenômenos envolvidos, tais como distribuição não uniforme de tráfego, *handoff*, etc. Esta análise é facilitada com o uso da simulação.

O modelamento da análise numérica é feito considerando o tráfego como um processo de *Markov*, em particular para um sistema de duas células, como um processo de nascimento e morte com estados bidimensionais. A solução do problema consiste em determinar as probabilidades dos estados de bloqueio das células. 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 impraticável. Um sistema de duas células, com N canais cada, implica a solução de um conjunto de $(N + 1)^2$ equações com o mesmo número de incógnitas. Em função disso as probabilidades dos estados são obtidas através da solução de um sistema linear de equações, que pode ser dada pela inversão de uma matriz com $[(N + 1)^2 * (N + 1)^2]$ elementos. A implementação do modelo e as considerações feitas podem ser vistas detalhadamente em [8].

3.4 Modelo de Simulação para Uma Célula

Uma simulação de um sistema é a operação de um modelo que o mesmo representa. O modelo é acessível à manipulação, ao passo que, esta manipulação poderia ser impossível, muito custosa, ou impraticável num sistema real. A operação do modelo pode ser estudada

e, a partir disso, propriedades relacionadas ao comportamento do sistema real podem ser inferidas.

Como foi citado anteriormente, a teoria tradicional de teletráfego se torna impraticável para sistemas complexos de comunicações móveis, e o alto custo da implementação de sistemas reais torna-se economicamente inviável para experimentos visando a melhoria da capacidade de tráfego através de técnicas alternativas. Em vista destas dificuldades a simulação oferece uma boa saída em termos de *custo x benefício*.

Os modelos analíticos neste contexto são limitados em muitos aspectos devido ao baixo grau de liberdade permitido ao se limitar o número de fenômenos envolvidos. Em sistemas reais um grande número de variáveis deve ser levado em consideração, tornando a manipulação analítica intratável. Eles são usados geralmente como um guia para localizar com precisão as características mais importantes do comportamento do sistema. O modelo de simulação pode incluir uma quantidade maior de características de um sistema real do que os modelos analíticos. Além disso há a possibilidade de alterações dos parâmetros ou modelos a um baixo custo e sem maiores dificuldades.

O modelo para uma célula é, de fato, o mais simples de todos já que, considerando-se a célula isolada no sistema, não existem fatores externos, como por exemplo o *handoff*, alterando o processo de tráfego. Admitindo-se chegadas *Poissonianas* e tempo de retenção de chamadas com distribuição exponencial negativa, a probabilidade de bloqueio pode ser calculada diretamente com a fórmula *Erlang-B*. A simulação deste caso constitui a base para a simulação de sistemas maiores.

Assuma uma célula com N canais onde as chegadas são *Poissonianas* de média λ chamadas/segundo com duração exponencial negativa de média $1/\mu$ segundos. O tráfego oferecido é então λ/μ e o tempo entre chamadas tem uma distribuição exponencial negativa de média $1/\lambda$. A simulação deste processo de tráfego consiste então em se gerarem chamadas espaçadas de um tempo médio igual a $1/\lambda$ onde cada chamada terá uma duração média de $1/\mu$. Ambos $1/\lambda$ e $1/\mu$ são médias de uma distribuição exponencial negativa. O fluxograma do Apêndice A ilustra este procedimento.

3.5 Modelo de Simulação para Duas Células

O primeiro passo para a modelagem do processo de tráfego para duas células consiste na identificação dos fluxos de tráfego pertinentes. Identificados estes fluxos a simulação segue forma semelhante aquela descrita na seção anterior para cada um dos fluxos identificados. Obviamente, deverão ser levadas em conta as interações mútuas e as decisões conjuntas para a ocupação dos canais. De acordo com os fluxos de tráfego a serem gerados na simulação, foram explorados três modelos: Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3 como descritos nos itens seguintes. Os modelos consideram as estações móveis uniformemente distribuídas no sistema e seguem o modelo de tráfego descrito na Seção 3.1.

O que diferencia um modelo do outro é a quantidade de fontes de tráfego do sistema.

3.5.1 Modelo 1

Neste modelo há quatro fontes de tráfego conforme ilustrada na Figura 3.3. Estas fontes de tráfego são independentes entre si, sendo que $A1$ e $A2^1$ correspondem ao tráfego fixo das células 1 e 2, respectivamente, enquanto $A1_{12} + A2_{12}$ correspondem aos tráfegos flexíveis das células 1 e 2, respectivamente.

Utilizando-se as definições da Seção 3.2, é possível escrever estas fontes de tráfego em função dos parâmetros:

- (a) tráfego total (A);
- (b) desbalanceamento (β);
- (c) flexibilidade (γ).

Assim

$$A1 = \frac{A (1 - \gamma) (1 + \beta)}{2} \quad (3.10)$$

¹por conveniência a mesma notação para a região é empregada para o tráfego correspondente.

$$A2 = \frac{A (1 - \gamma) (1 - \beta)}{2} \quad (3.11)$$

$$A1_{12} = \gamma A \frac{A1}{A1 + A2} = \frac{\gamma A (1 + \beta)}{2} \quad (3.12)$$

$$A2_{12} = \gamma A \frac{A2}{A1 + A2} = \frac{\gamma A (1 - \beta)}{2} \quad (3.13)$$

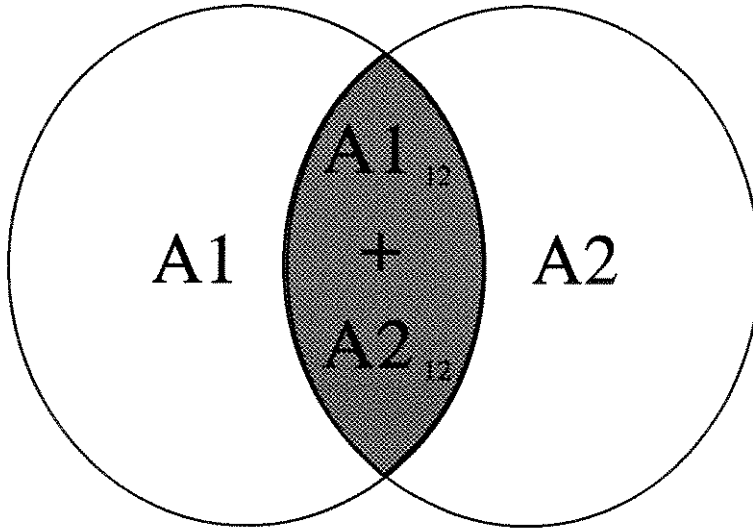


Figura 3.3: Fluxo de tráfego do Modelo 1

Da mesma forma a equação do bloqueio médio deste modelo é, então:

$$Bm = \frac{A1 B1 + A2 B2 + (A1_{12} + A2_{12}) B12}{A} \quad (3.14)$$

onde

- $B1$ é a probabilidade de bloqueio do tráfego $A1$;

- $B2$ é a probabilidade de bloqueio do tráfego $A2$;
- $B12$ é a probabilidade de bloqueio do tráfego flexível $A1_{12} + A2_{12}$.

Observe que $A1_{12} + A2_{12}$ é o tráfego total flexível do sistema ($A12 = \gamma A$) e a equação (3.14) é idêntica à (3.9).

3.5.2 Modelo 2

Neste modelo há três fontes de tráfego conforme a Figura 3.4. A parte fixa do sistema é determinada pelos tráfegos da região $A1$ e $A2$, enquanto a parte flexível é dada pelo tráfego flexível da região $A12$.

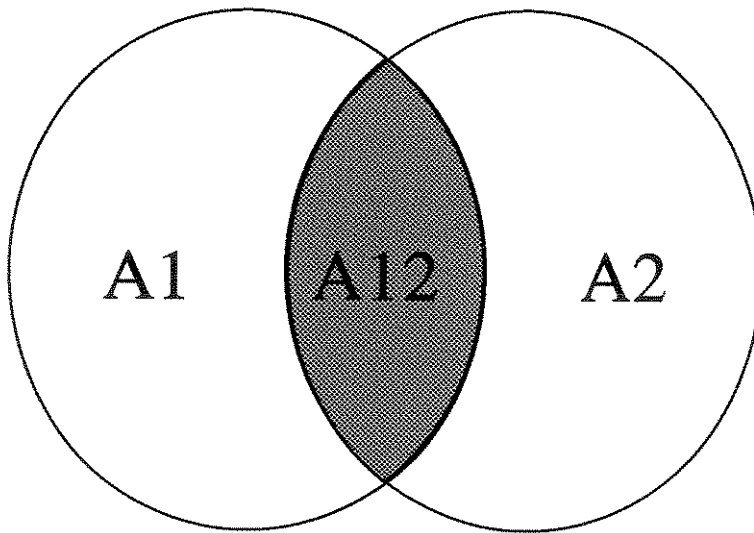


Figura 3.4: Fluxo de tráfego do Modelo 2

Note que o modelo é exatamente igual ao da Seção 3.2. Portanto as equações deste modelo são:

$$A1 = \frac{A (1 - \gamma) (1 + \beta)}{2} \quad (3.15)$$

$$A2 = \frac{A (1 - \gamma) (1 - \beta)}{2} \quad (3.16)$$

$$A12 = \gamma A \quad (3.17)$$

$$Bm = \frac{A1 B1 + A2 B2 + A12 B12}{A} \quad (3.18)$$

3.5.3 Modelo 3

Neste modelo, apesar do sistema ser dividido em três regiões de acordo com a Figura 3.5, há apenas duas fontes de tráfego correspondentes a *Célula 1* e *Célula 2*.

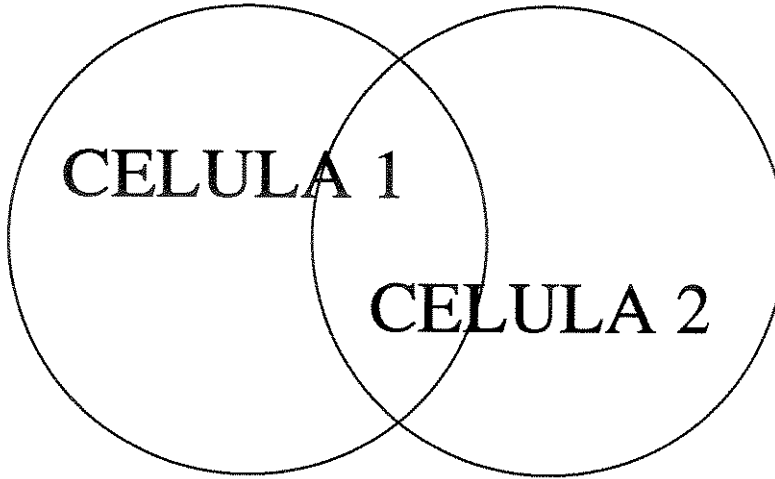


Figura 3.5: Fluxo de tráfego do Modelo 3

No entanto o tráfego das células é dividido em fixo ($A1$ e $A2$) e flexível ($A12$). A determinação das equações é feita através da manipulação algébrica dos parâmetros en-

volvidos, considerando a proporcionalidade de tráfego entre as regiões. Assim as equações do modelo são:

$$CÉLULA\ 1 = A1 + A12 \frac{A1}{A1 + A2} = \frac{A(1 + \beta)}{2} \quad (3.19)$$

$$CÉLULA\ 2 = A2 + A12 \frac{A2}{A1 + A2} = \frac{A(1 - \beta)}{2} \quad (3.20)$$

Os tráfegos fixos e flexível são gerados através de uma manipulação conveniente do tempo de geração de chamadas. Este tempo é de fato uma variável aleatória que, normalizada, tem uma distribuição uniforme de 0 a 1. Assim, por uma proporção γ deste tempo as chamadas serão consideradas flexíveis (geradas na região de sobreposição das células). Da mesma forma, por uma proporção $1 - \gamma$ deste tempo as chamadas serão consideradas fixas (geradas na parte fixa das células). O bloqueio médio será:

$$Bm = \frac{A1\ B1 + A2\ B2 + A12\ B12}{A} \quad (3.21)$$

3.6 Implementação dos Modelos de Simulação

A linguagem utilizada para os modelos de simulação foi o *SIMULA* [16]. A simulação gera uma saída que determina o desempenho em termos de probabilidades de bloqueio.

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

- Dados de Entrada:
 - Número de canais por célula (N).
 - Tráfego total oferecido ao sistema (A).
 - Proporção de tráfego flexível (γ).
 - Desbalanceamento de tráfego entre as células (β).
 - Limiar de bloqueio a ser analisado (L).
 - Tempo da simulação (TEMPO).

- Dados de saída:
 - Os valores dos dados de entrada.
 - Os tráfegos calculados ($A1, A2, A12$).
 - Medidas de desempenho ($B1, B2, B12, Bm$).

Os detalhes da implementação dos três modelos podem ser vistos nos Apêndices *B*, *C* e *D*.

3.7 Resultados

Nesta seção analisa-se o desempenho do sistema de rádio móvel celular ao se aplicar a técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio**, comparando-se os resultados obtidos do modelo da *análise numérica* [8] com os da *simulação*.

Relativamente ao sistema de uma célula o interesse seria apenas o de validar o modelo de simulação comparando-se os resultados com a fórmula *Erlang-B*. Como isto pode ser feito para casos particulares do sistema bicelular, não nos preocuparemos aqui em mostrar estes resultados.

Os resultados apresentados para o modelo de duas células foram obtidos através da manipulação de A , β , γ , N e L variando-os a fim de se conhecer o comportamento de um determinado sistema com as características desejadas em termos de *carga de tráfego*, *desbalanceamento*, *flexibilidade*, *número de canais* e *limiar de bloqueio*.

3.7.1 Bloqueio Médio versus Desbalanceamento

As Figuras 3.6 a 3.8 representam os gráficos para os parâmetros $\gamma = 50\%$, $A = 6$ erl, $N = 6$ canais e β variando de 0 até 100 % para cada um dos três modelos.

Observa-se que quanto menor for o limiar menor é também a probabilidade de bloqueio médio. 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. Veja que a curva superior representa o limiar $L = N + 1$ onde não há utilização da técnica. Neste caso a fórmula *Erlang-B* se aplica. A partir de $L = N$ o ganho passa a ser bastante significativo em termos de probabilidade de bloqueio médio. Note que para limiares baixos ($L \leq 3$) as curvas são praticamente coincidentes. Para se ter uma idéia do ganho obtido com a aplicação da técnica, observe que para $\gamma = 50\%$, $\beta = 50\%$ (Figura 3.8) o bloqueio diminui de 12 % em $L = 7$ (sem a técnica) para 2.5 % em $L \leq 3$. Houve uma melhoria de 79 % no sistema com relação ao bloqueio médio. Os resultados obtidos com a *análise numérica* e os três modelos da simulação são idênticos.

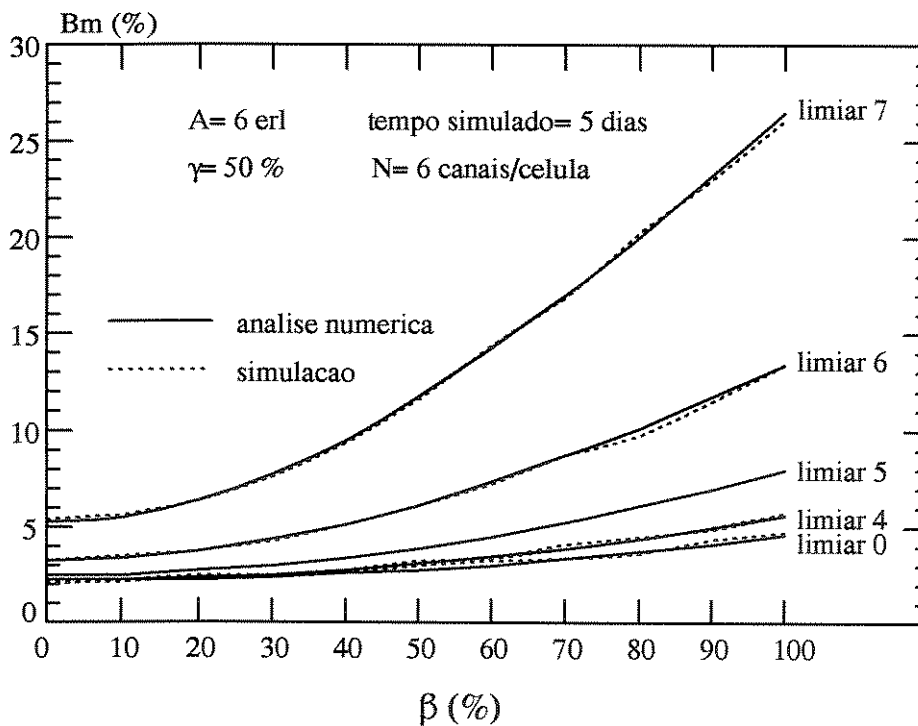


Figura 3.6: Bloqueio Médio X Desbalanceamento (Modelo 1)

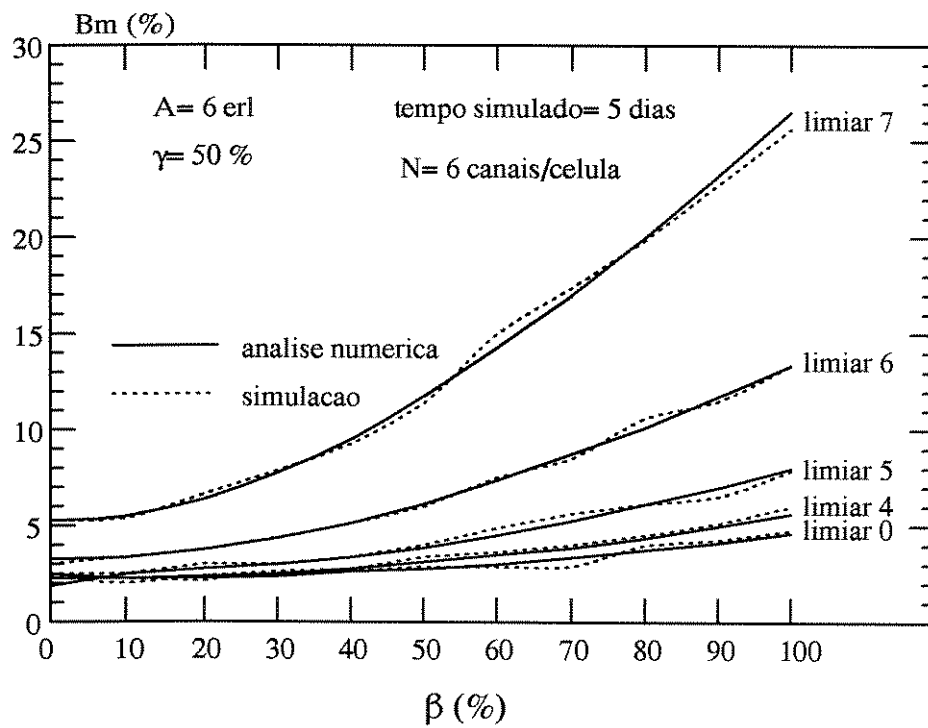


Figura 3.7: Bloqueio Médio X Desbalanceamento (Modelo 2)

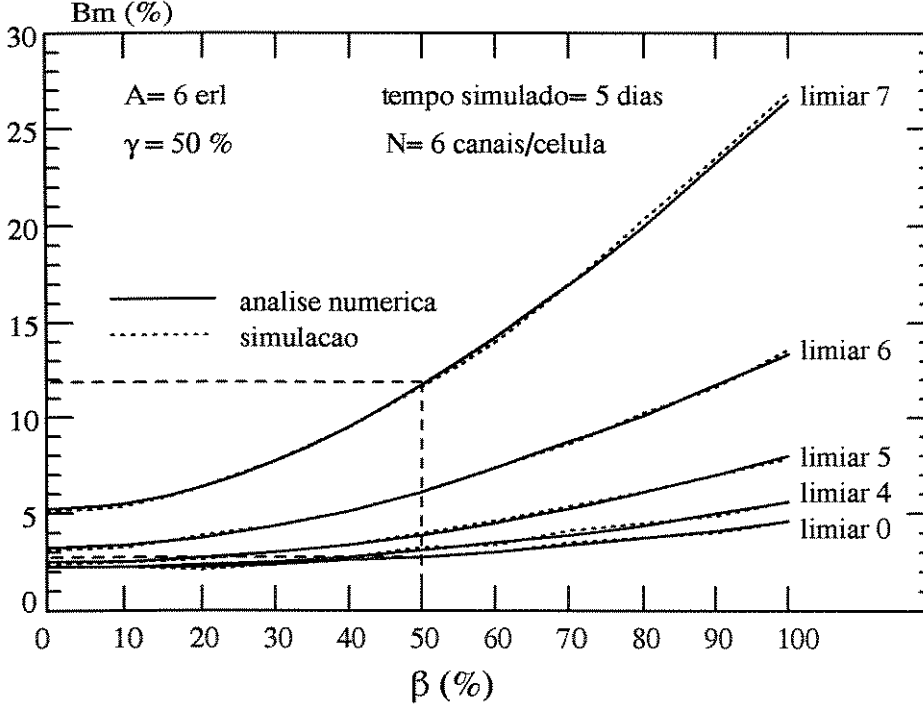


Figura 3.8: Bloqueio Médio X Desbalanceamento (Modelo 3)

3.7.2 Bloqueio Médio versus Flexibilidade

Seja agora o caso em que o parâmetro flexibilidade γ varie mantendo-se os demais parâmetros fixos. As Figuras 3.9 a 3.11 representam o desempenho do sistema dos três modelos para $\beta = 50 \%$, $A = 6 \text{ erl}$ e $N = 6 \text{ canais}$. Note que para $\gamma = 0$ (flexibilidade nula) a estratégia independe do *limiar* adotado, o mesmo acontecendo para um *limiar* $L \geq N+1$, onde a fórmula *Erlang-B* se aplica. Observe que os resultados obtidos com a simulação dos três modelos e a *análise numérica* são muito próximos. Veja que a probabilidade de bloqueio médio diminui de 11.3 % para 3.5 % (Figura 3.11), o que implica uma queda de 69 % na taxa de bloqueio médio, quando se utiliza a **Variação do Limiar de Bloqueio** para $\gamma = 40 \%$ e $\beta = 50 \%$.

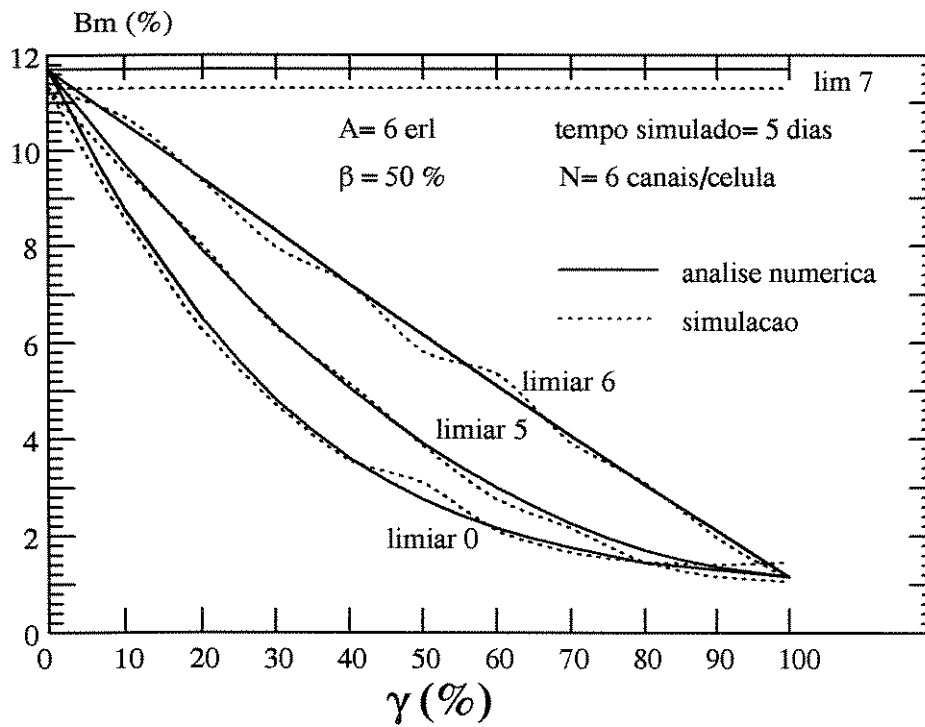


Figura 3.9: Bloqueio Médio X Flexibilidade (Modelo 1)

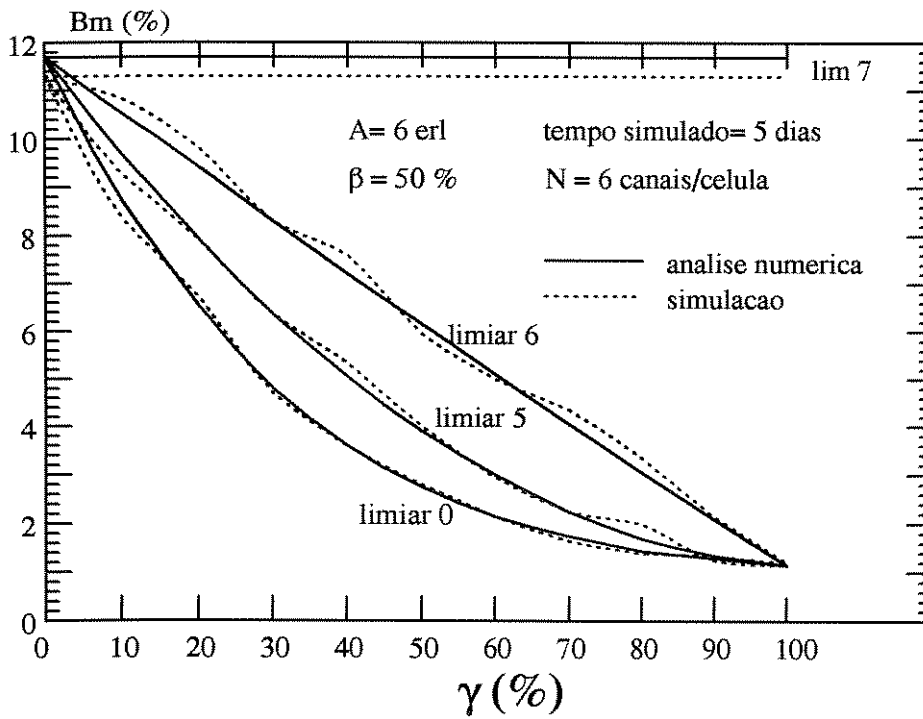


Figura 3.10: Bloqueio Médio X Flexibilidade (Modelo 2)

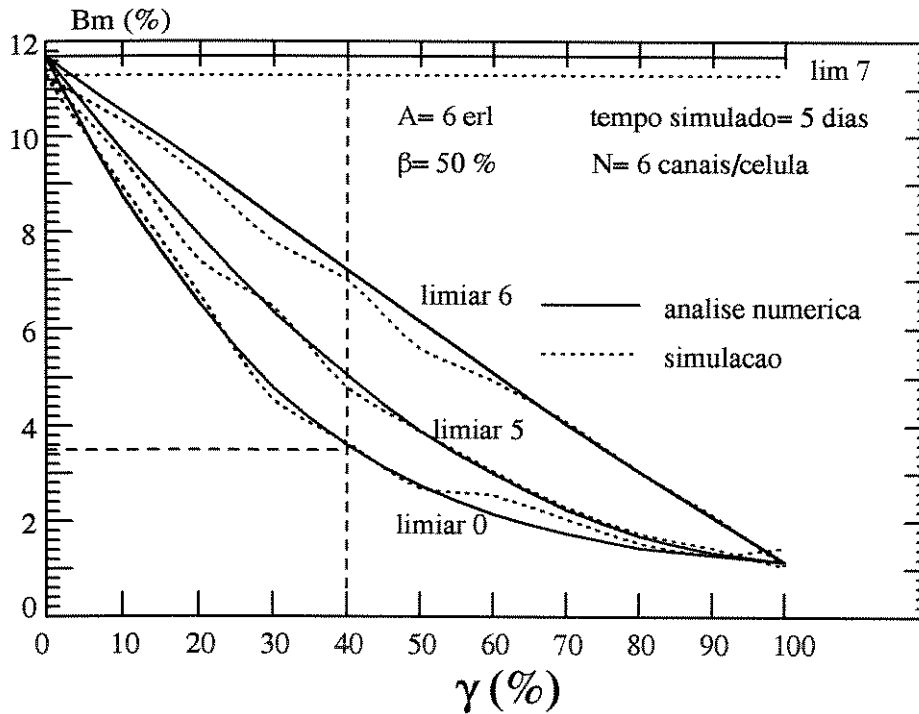


Figura 3.11: Bloqueio Médio X Flexibilidade (Modelo 3)

3.7.3 Bloqueio Médio versus Tráfego

As Figuras 3.12 a 3.14 indicam o comportamento dos três modelos da simulação quando é variado o tráfego. Veja que na Figura 3.14 existe um aumento da capacidade de escoamento de tráfego de 4.3 erl para 6.8 erl. Isto representa um ganho em torno de 58 % para um bloqueio médio de 5 % e valores de $\gamma = 40\%$, $\beta = 50\%$ e $N = 6$ canais. Novamente os valores obtidos com os três modelos da simulação e a *análise numérica* são coincidentes.

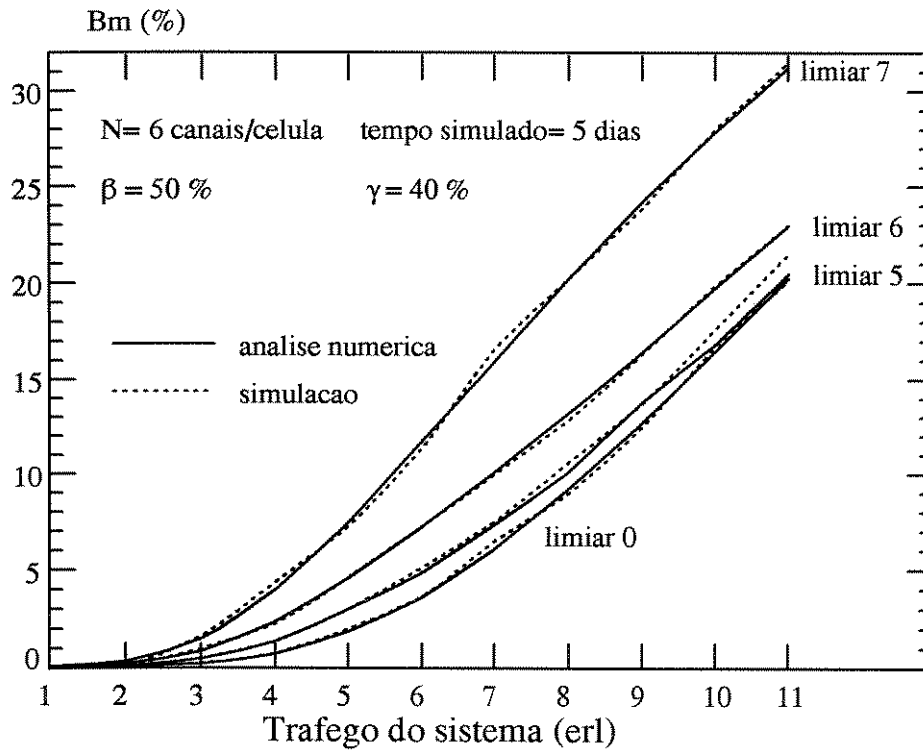


Figura 3.12: Bloqueio Médio X Tráfego (Modelo 1)

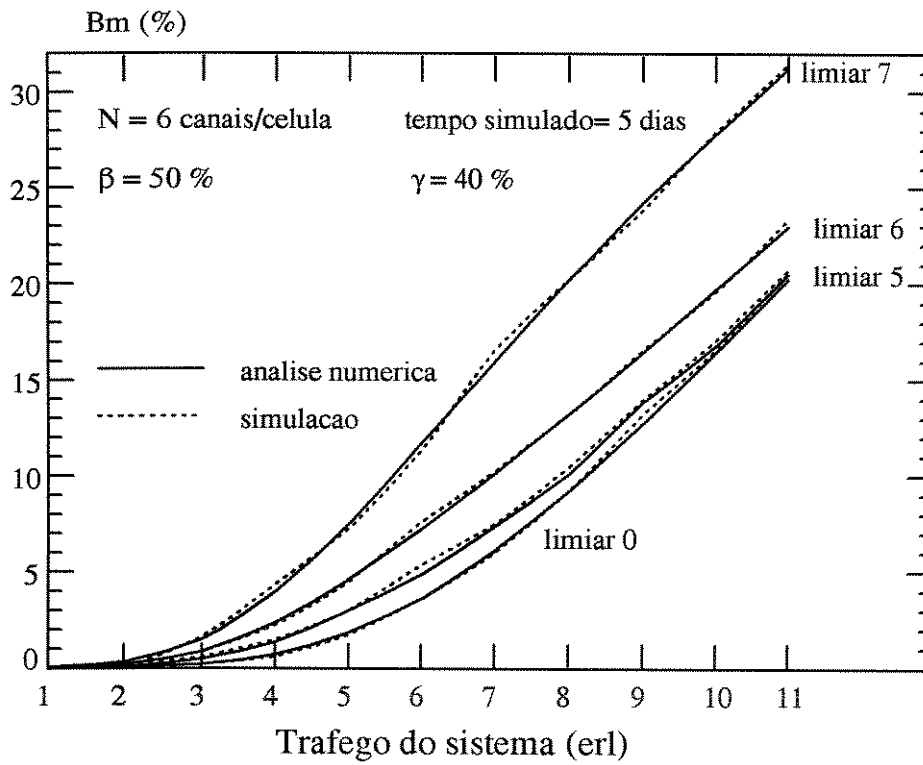


Figura 3.13: Bloqueio Médio X Tráfego (Modelo 2)

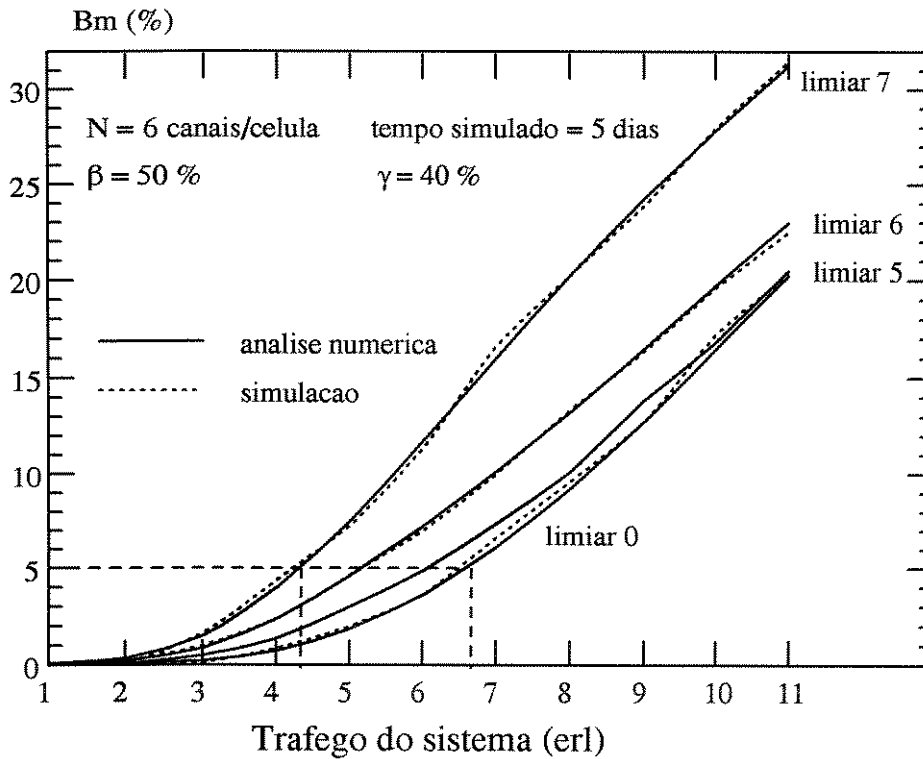


Figura 3.14: Bloqueio Médio X Tráfego (Modelo 3)

3.8 Conclusão

Pelos resultados obtidos verifica-se que os três modelos seguem o comportamento da *análise numérica* de maneira fiel, validando os modelos da simulação. Deste modo, qualquer um dos três modelos explorados pode servir como base para um sistema maior. Entretanto à medida que se aumenta o número de células, a *geração de chamadas* também aumenta. Portanto é mais conveniente escolher aquele que utilize o menor número de *geração de chamadas*, ou seja o *Modelo 3*.

Capítulo 4

Sistema de Grande Porte

Neste capítulo são analisados os aspectos qualitativos e quantitativos, além da modelagem e simulação, dos fenômenos envolvidos num sistema de grande porte relativamente à técnica **Variação do Limiar de Bloqueio**.

A Seção 4.1 analisa o modelo de tráfego de maneira realista, ao contrário do que foi feito no capítulo anterior. O fenômeno de *handover* é considerado no modelo.

A Seção 4.2 fornece os parâmetros de tráfego e medidas de desempenho. Estes parâmetros são importantes na caracterização do sistema e as medidas de desempenho oferecem uma comparação entre a **Variação do Limiar de Bloqueio** e a técnica convencional.

A Seção 4.3 descreve dois sistemas de grande porte: ideal e real. As equações de tráfego e bloqueio médio são determinadas nesta seção.

A Seção 4.4 comenta, de maneira sucinta e breve, a linguagem de simulação utilizada, bem como os dados de entrada e saída.

A Seção 4.5 apresenta a validação dos modelos propostos nas seções anteriores.

A Seção 4.6 mostra a utilidade da simulação quando é aplicada para um sistema ideal. Esta simulação é usada para comparar a técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio** com a alocação fixa de canais. A comparação é feita em termos de probabilidade de bloqueio médio.

A Seção 4.7 simula um sistema real. Os resultados mostram que a técnica **Variação**

do **Limiar de Bloqueio** apresenta um desempenho notavelmente bom quando o sistema está desbalanceado.

4.1 Modelo de Tráfego

Suponha uma *área de serviço de rádio móvel* conectada à *rede fixa* com um grande número de assinantes móveis. Considere o processo estocástico de ocupação de canais do sistema móvel devido a chegada de três tipos de chamadas: (1) fixa para móvel, (2) móvel para fixa e (3) móvel para móvel. Como uma primeira aproximação, considere que a chegada aleatória de tais chamadas ocorre como processos de *Poisson* com as características mostradas na Tabela 4.1.

Tipo de chamada	Taxa de chegada
1- Fixa para móvel	λ_{FM}
2- Móvel para fixa	λ_{MF}
3- Móvel para móvel	λ_{MM}

Tabela 4.1: Taxas de chamada em uma célula

Suponha que, para os três tipos de tráfego, os tempos médios de duração das chamadas, h_{FM} , h_{MF} e h_{MM} , sejam idênticos e exponencialmente distribuídos. Assim:

$$h = h_{FM} = h_{MF} = h_{MM} \quad (4.1)$$

Chamadas móveis para fixas e fixas para móveis requerem um canal bidirecional, enquanto chamadas móveis para móveis necessitam de dois canais bidirecionais. A proporção do *tráfego-móvel-para móvel* para o *tráfego total* é muito pequeno. Considere que o tráfego total continuará sendo um processo de *nascimento e morte*, apesar da ocupação simultânea de dois canais bidirecionais para chamadas móveis para móveis, com as seguintes características:

$$\text{Tráfego Total} \triangleq A = \lambda h = a_{FM} + a_{MF} + 2 a_{MM} = \lambda_{FM} h_{FM} + \lambda_{MF} h_{MF} + 2 \lambda_{MM} h_{MM} \quad (4.2)$$

Então existe um tempo médio de duração da chamada h e uma taxa equivalente de chegadas de ocupação do canal λ para o sistema.

Quando uma área de serviço é dividida em células ou setores o tráfego total será distribuído pelos mesmos de acordo com o tamanho das suas células e concentração de estações móveis. Os procedimentos dos três tipos de chamada serão as mesmas, exceto que o efeito de distorção do tráfego móvel para móvel será reduzido, pois as chamadas móveis para móveis não serão realizadas todas numa mesma célula. Isto diminui a probabilidade da requisição simultânea de dois canais na mesma célula.

Enquanto em uma área de serviço unicolor não há distinções entre começo, tempo de duração, fim de uma chamada e ocupação, tempo de duração e liberação de um canal, em um sistema multicelular a situação é bem diferente. Quando assinantes móveis transitam de célula para célula, eles geram chamadas que ocupam canais em uma célula por um determinado tempo da chamada, requisitam outro canal em outra célula e libera o anterior para completar a chamada. Existem mais requisições de canais do que novas tentativas de chamadas. O tempo de duração do canal é mais curto do que o da chamada.

4.1.1 Geração de Tráfego Móvel

As Figuras 4.1 a 4.4 mostram o modelo básico do tráfego móvel [14]. A linha vertical cheia e os blocos ligados a ela indicam ações que ocorrem em cada uma das partes envolvidas no sistema móvel:

- Centro de Controle e Comutação (CCC) que centraliza o controle de alocação de canal;
- Estação Base (EB) que transmite as mensagens para e do CCC e EM;
- Estações Móveis (EM) que controlam as atividades relacionadas a handover;

- detecção dos níveis de potência que levam para o handover;
- indicação da nova EB onde o sinal é melhor recebido;
- retentativas de handover e bloqueio da chamada se o período de *timeout* expirar.

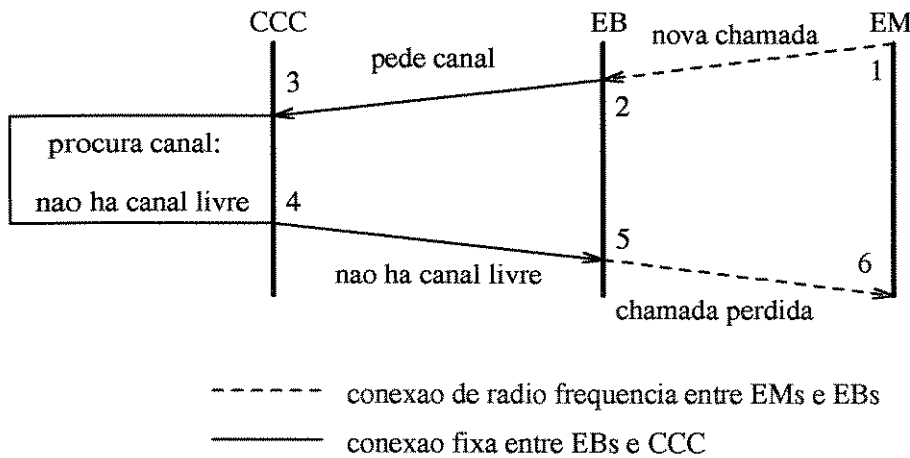


Figura 4.1: Bloqueio de nova chamada

As linhas diagonais indicam mensagens entre as partes envolvidas. As linhas tracejadas representam canais de rádio entre EMs e EBs, e as linhas cheias qualquer tipo de conexão fixa entre EBs e CCC. Eventos acontecem em sequência em instantes numerados 1, 2, 3, etc. A separação vertical não é uma escala de tempo.

Embora as chamadas sejam originadas no lado da rede fixa e no lado móvel, somente as chamadas geradas na parte móvel são descritas.

A construção do modelo de tráfego é iniciada considerando-se as chamadas bloqueadas como perdidas. Caso não haja handover, o sistema terá um comportamento análogo aos das Figuras 4.1 e 4.2. Na Figura 4.1 a EB requisita um canal para uma nova chamada, mas não há canal disponível no CCC e a chamada é perdida. Na Figura 4.2 a procura por um canal para a nova chamada é bem sucedida. A conexão com a rede fixa é estabelecida

entre 3 e 4. O tempo entre 6 e 7 é dado pela distribuição da duração da chamada.

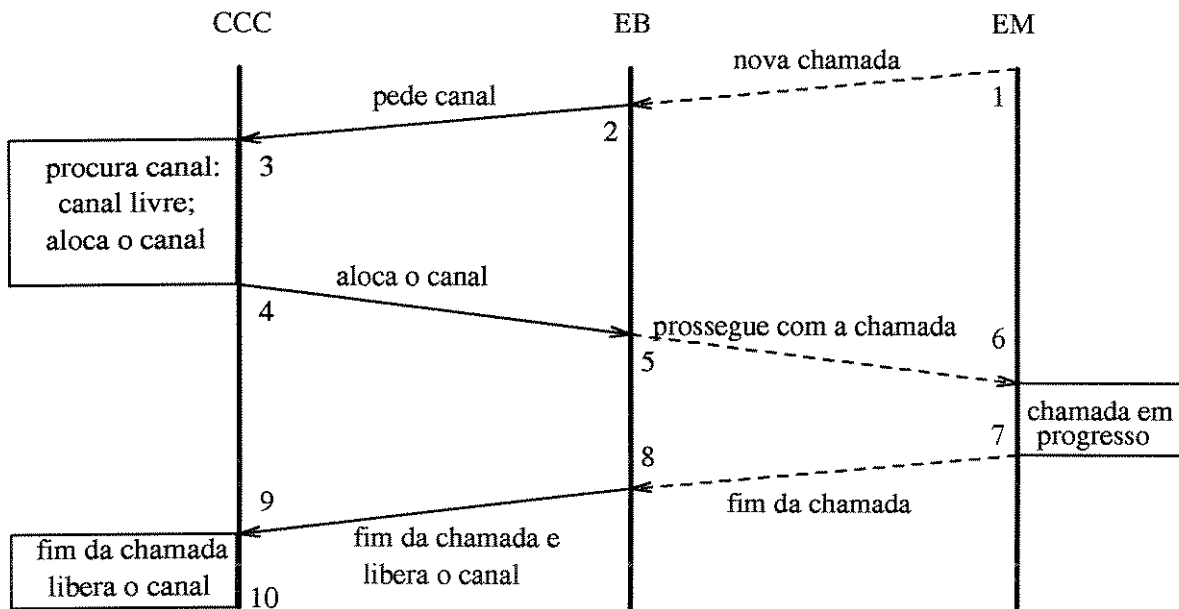


Figura 4.2: Chamada com sucesso sem handover

Até este ponto, sem considerações de handover, o tráfego gerado em cada célula pode ser visto como um processo de *Poisson* para chegada de chamadas e distribuição exponencial negativa para duração de chamadas.

4.1.2 Handover

A necessidade de handover será detectada tanto pela EM como EB quando o nível do sinal do canal cai abaixo de um determinado valor (*threshold*). Cada EB possui um ou mais canais de sinalização, que se comunicam com as EMs durante um curto intervalo de tempo para estabelecimento de chamadas, ocupação prévia de canais de voz, registro de assinantes, localização, etc. À medida que uma EM cruza a fronteira da célula, esta EM detecta diminuição no nível do sinal. A EM compara a intensidade dos canais de

sinalização das células vizinhas e a EB com o sinal mais forte será escolhida em substituição à anterior. Entretanto a EM necessitará ser reconectada, ou seja, alocada a um novo canal de voz.

O algoritmo de handover consiste de repetidas tentativas durante um período de tempo, conforme descrito nas Figuras 4.3 e 4.4.

No evento 7, Figura 4.3, a EM requisita a mudança da EBi para EBii. A EBi transfere mensagens para e da CCC. Se a CCC não encontra um canal disponível para a EBii a EM será instruída a continuar conectada a EBi pelo mesmo canal. A EM requisitará novamente a mudança em 13, 19, etc. de acordo com um programado número de tentativas e enquanto o tempo de *timeout* não expirar. No evento 20, respondendo a última tentativa de handover permitida, a EM é ordenada a permanecer na mesma conexão até que o tempo de *timeout* expire, em 21. Em 21 a EM forçará o término da chamada.

A Figura 4.4 mostra a situação de um handover completado com sucesso. Até o evento 18 a situação é similar à da Figura 4.3, porém a primeira tentativa de handover é feita com sucesso. Em 22 a CCC instrui a EBii para preparar um canal para a EM que está chegando. Simultaneamente, a EM emite a ordem para alterar sua conexão da EBi para EBii, liberando o canal em EBi e procedendo como se fosse o final de uma chamada.

Em implementações reais, este procedimento de handover pode ser complementado com outra detecção de limiar. Se o sinal cair abaixo de um certo nível a chamada pode ser bloqueada devido ao ruído excessivo, mesmo que o tempo de *timeout* não tenha expirado.

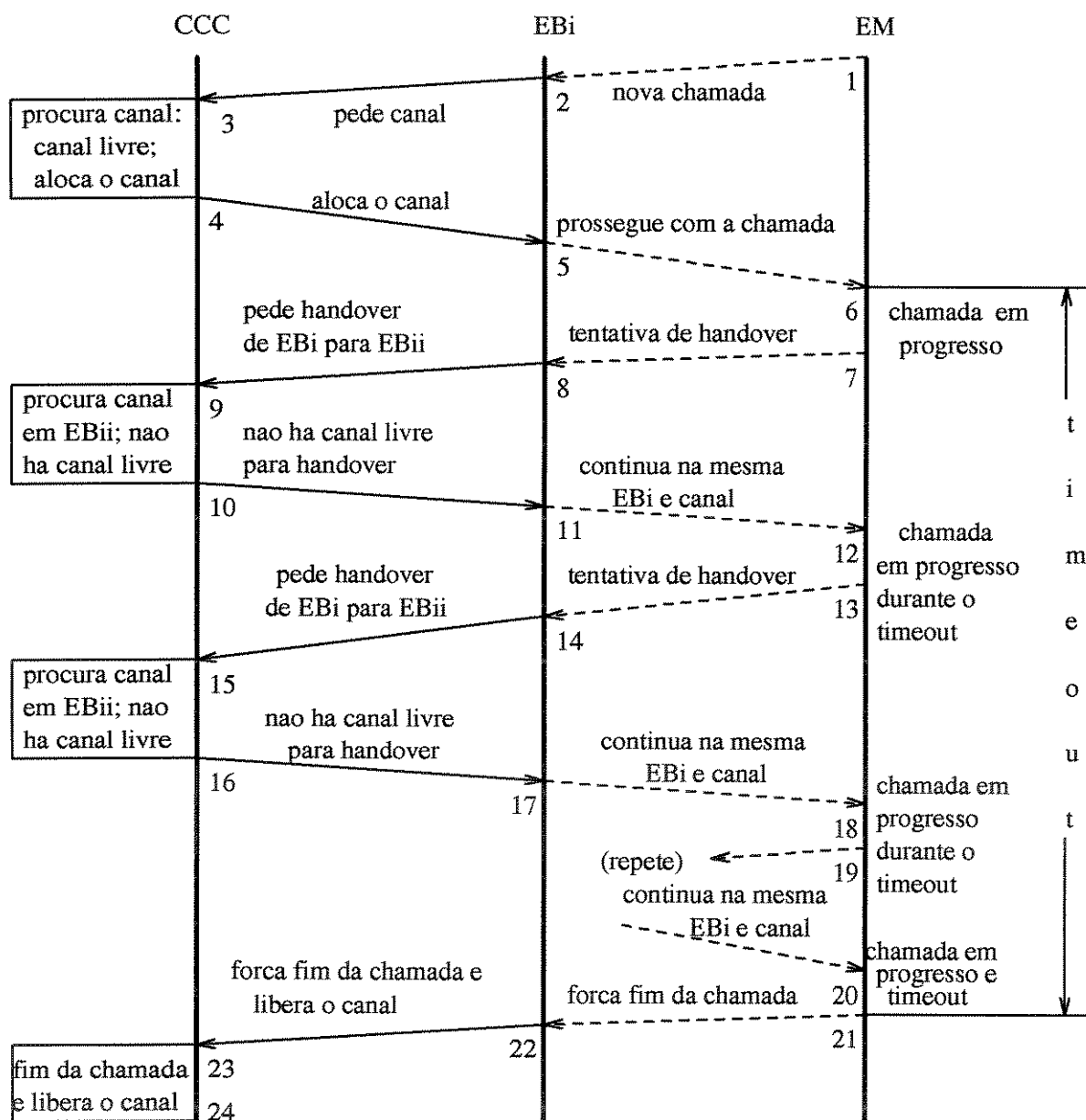


Figura 4.3: Chamada com sucesso sem completar o handover

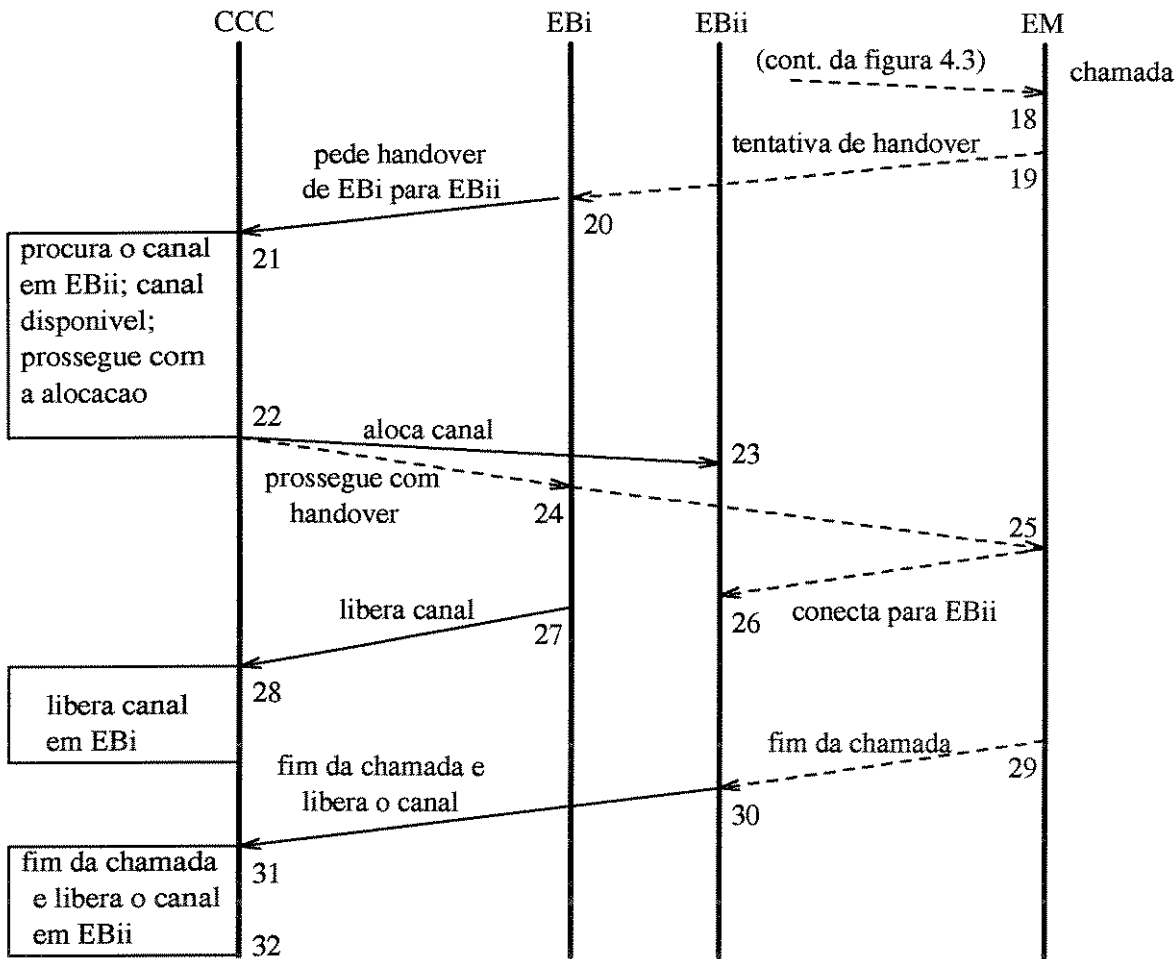


Figura 4.4: Chamada com sucesso completando o handover

4.1.3 Probabilidade de Bloqueio de Handover

Considere a Figura 4.5 onde os números entre parênteses correspondem aos eventos da Figura 4.3.

A primeira tentativa de handover inicia-se no instante T_{H1} , uniformemente distribuída entre T_I , o início da chamada, e T_T , o término da chamada normal. A distribuição uniforme é usada por causa da incerteza do momento em que a EM cruza a fronteira. Suponha que o canal requisitado para o handover não tenha diferença em relação ao de uma nova chamada, e que a primeira tentativa de handover tenha uma probabilidade de

bloqueio $P_{H1} = P_N$, idêntica ao de uma nova chamada. Após cada tentativa infrutífera de handover, o mesmo será bloqueado se:

1. Nenhuma chamada da célula vizinha, onde o handover é tentado, termina antes de Δt . Se alguma chamada termina, uma nova é originada antes de Δt .
2. Esta chamada, que está tentando o handover, não termina antes de Δt .

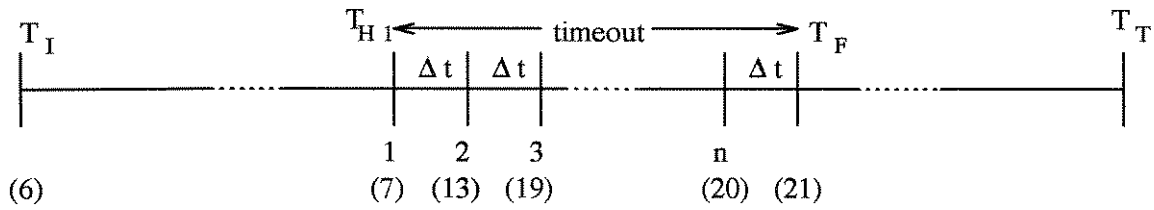


Figura 4.5: Tentativas de handover

Suponha que a célula vizinha tenha N_R canais e a duração da chamada apresenta uma distribuição exponencial negativa.

Para calcular a probabilidade α da hipótese 1, seja T a variável aleatória que indica o término de uma chamada na célula vizinha. Se h é a duração média da chamada, λ_R a taxa de chegada da célula vizinha e assumindo tráfego de *Poisson*:

$$\alpha = P(T > \Delta t) + \int_0^{\Delta t} [1 - P_0(\Delta t - T)] f_T(t) dt \quad (4.3)$$

onde $f_T(t)$ é a função distribuição de probabilidade de T e $P_0(x) = e^{-\lambda x}$ é a probabilidade da não ocorrência de chamadas no intervalo de tempo x .

Assim

$$\alpha = e^{-N_R \Delta t / h} + \int_0^{\Delta t} [1 - e^{-\lambda_R(\Delta t - t)}] \frac{N_R}{h} e^{-N_R t / h} dt = 1 - \frac{N_R}{N_R - \lambda_R h} (e^{-\lambda_R \Delta t} - e^{-N_R \Delta t / h}) \quad (4.4)$$

Isto é uma aproximação válida para pequenos valores de Δt . Assim $T_0 = n \Delta t$ é o *timeout*. Para grandes valores de Δt a aproximação já não descreve com exatidão o

processo, pois outros eventos podem ocorrer na célula vizinha, onde o tráfego assumido é de *Poisson*.

O handover será bloqueado completamente ao final do *timeout* se a hipótese 1 ocorrer $n - 1$ vezes e a chamada ainda não tiver terminado (hipótese 2).

Seja a variável aleatória $S = X Y$ que indica o restante da duração da chamada na célula original, onde X é a variável aleatória da duração da chamada e Y é uniforme em $(0,1)$. Assim

$$P(S > t) = P(Y > \frac{t}{x}) = \int_t^\infty (1 - \frac{t}{x}) \frac{1}{h} e^{-\frac{x}{h}} dx = e^{-\frac{t}{h}} \int_0^\infty \frac{z/h}{z+t} e^{-\frac{z}{h}} dz \quad (4.5)$$

Então a probabilidade do handover ser bloqueado é

$$P_H = P_N \alpha^{n-1} P(S > T_0) = P_N [1 - \frac{N_R}{N_R - \lambda_R h} (e^{-\frac{\lambda_R T_0}{n}} - e^{-\frac{N_R T_0}{nh}})]^{n-1} e^{-\frac{T_0}{h}} \int_0^\infty \frac{z/h}{z+T_0} e^{-\frac{z}{h}} dz \quad (4.6)$$

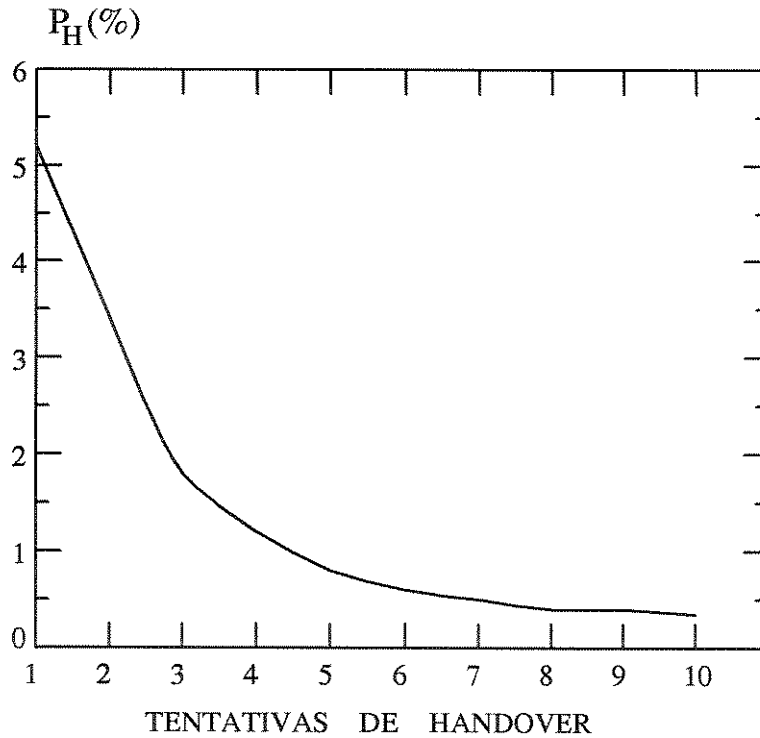


Figura 4.6: Probabilidade de bloqueio de handover

A Figura 4.6 mostra os resultados da equação (4.6) usando $P_N = 0.1$, $T_0 = 30$ s, $h = 2$ min, $N_R = 15$ canais e n , o número máximo de tentativas de handover por chamada, variando de 1 a 10.

4.2 Parâmetros de Tráfego e Medidas de Desempenho

No estudo de sistemas de grande porte pretende-se que o mesmo conjunto de parâmetros definidos anteriormente no Capítulo 3 sejam mantidos. Assim temos:

- tráfego total (A);
- flexibilidade (γ);
- desbalanceamento (β);
- número de canais por célula (N);
- limiar de bloqueio (L).

A flexibilidade é assumida igual para todas as células do sistema. O principal interesse é com o desbalanceamento β que pode, de uma maneira lógica, ser estendido para sistemas de grande porte.

Existem dois grupos diferentes de fluxo de tráfego: (i) tráfego fixo e (ii) tráfego flexível com dois caminhos de rádio (alternativas). Em um arranjo hexagonal de células, cada célula é circundada por outras seis. Consequentemente, a célula pode experimentar um fluxo de tráfego do tipo fixo e 6 do tipo flexível. Definem-se:

- (a) A_i como o tráfego fixo da célula i ;
- (b) A_{ij} como o tráfego flexível com duas alternativas, com acesso às células i e j .

Em sistemas reais pode existir ainda o tráfego flexível com duas ou mais alternativas (intersecção de duas ou mais células), mas a proporção de tráfego flexível com duas

alternativas é muito maior. A análise de tráfego flexível com três alternativas é feita em [9, 10].

4.2.1 Proporção do Tráfego Flexível

A teoria desenvolvida no capítulo anterior será amplamente utilizada aqui. Seja A_i o tráfego fixo da célula i . Assim num sistema com n células e tráfego total A é verificado facilmente que

$$\sum_{i=1}^n A_i = (1 - \gamma)A \quad (4.7)$$

O tráfego flexível da célula i é dado por $A2_i$, onde

$$A2_i = \frac{\gamma}{1 - \gamma} A_i \quad (4.8)$$

Em (4.8) $A_i/(1 - \gamma)$ é o tráfego total da célula i .

4.2.2 Desbalanceamento de Tráfego

A média $\bar{A}$ do tráfego fixo é

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (4.9)$$

O desbalanceamento individual β_i da célula i é definido como

$$\beta_i \triangleq \frac{A_i - \bar{A}}{\bar{A}} \quad (4.10)$$

Da equação (4.10) é óbvio que

$$-1 \leq \beta_i \leq n - 1 \quad (4.11)$$

Novamente a interpretação de β é feita de forma direta:

- $\beta_i = -1$, implica nenhum tráfego na célula i ;
- $\beta_i = 0$, implica que o tráfego da célula i está balanceado com o tráfego médio;
- $\beta_i = n-1$, implica que todo o tráfego do sistema está na célula i .

Da definição do desbalanceamento individual

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 0 \quad (4.12)$$

4.2.3 Relações entre os Parâmetros de Tráfego e Fluxos de Tráfego

As expressões (4.7) à (4.12) podem ser facilmente manipuladas para dar os fluxos de tráfego em termos dos parâmetros definidos. Assume-se que o tráfego flexível de cada célula é uniformemente distribuído entre as regiões de intersecção. Define-se $b2_i$ como o número de células vizinhas que a célula i possui. Assim

$$\begin{aligned} A_i &= (1 + \beta_i) \bar{A} \\ &= (1 + \beta_i) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \\ &= \frac{1}{n} A (1 - \gamma) (1 + \beta_i) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Da mesma forma

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \frac{A2_i}{b2_i} + \frac{A2_j}{b2_j} \\ &= \frac{1}{b2_i} \frac{\gamma}{1-\gamma} A_i + \frac{1}{b2_j} \frac{\gamma}{1-\gamma} A_j \\ &= \frac{1}{b2_i} \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{1}{n} A (1 - \gamma) (1 + \beta_i) + \frac{1}{b2_j} \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{1}{n} A (1 - \gamma) (1 + \beta_j) \\ &= \frac{1}{n} A \gamma \left[\frac{1+\beta_i}{b2_i} + \frac{1+\beta_j}{b2_j} \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

onde A_{ij} é o tráfego flexível com acesso às células i e j e pertencente a ambas as células.

Num arranjo hexagonal infinito $b2_i = b2_j = 6$.

4.2.4 Medidas de Desempenho

O desempenho do sistema é avaliado através das probabilidades de bloqueio. O bloqueio médio é calculado diretamente da média geométrica das probabilidades de bloqueio do tráfego fixo e flexível de cada célula do sistema conforme a equação (4.15).

$$\begin{aligned} Bm &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b2_i} A_{ij} B_{ij}}{A} \\ &= \frac{(1-\gamma) \sum_{i=1}^n (1+\beta_i) B_i + \gamma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b2_i} \left[\frac{1+\beta_i}{b2_i} + \frac{1+\beta_j}{b2_j} \right] B_{ij}}{n} \end{aligned} \quad (4.15)$$

onde

- B_i é a probabilidade de bloqueio do tráfego fixo da célula i ;
- B_{ij} é a probabilidade de bloqueio da região de intersecção da célula i (parte flexível) com a célula vizinha da fronteira j , dentre as b_{2i} células, que a contornam.

4.3 Modelo de Sistemas de Grande Porte

A seguir são descritos dois modelos para a simulação de sistemas de grande porte: um ideal (sistema infinito) e outro real (baseado no sistema celular de Tóquio). Ao contrário do que foi feito no capítulo anterior, os modelos são construídos de forma mais próxima da realidade levando-se em conta certas peculiaridades da telefonia móvel, como o *handover*.

Os dois modelos consideram as estações móveis uniformemente distribuídas dentro de cada célula, mas podendo ter distribuições diferentes entre uma célula e outra, e seguem o modelo de tráfego descrito na Seção 4.1.

4.3.1 Sistema Ideal (Infinito)

Considere um sistema como o da Figura 4.7 onde cada célula é circundada sempre por outras seis. O padrão de 7 células é repetido “*indefinidamente*” originando um sistema “*infinito*”.

A análise deste modelo pode ser feita tomando-se o número total de células do sistema como 49, porém cada célula do sistema circundada por outras seis. Isto equivale dizer que as células estão dispostas numa superfície *toroidal* sendo que qualquer assinante móvel estará sempre dentro de uma área de serviço. No sistema celular infinito como este eliminam-se os efeitos do tráfego anômalo das células da periferia onde o cruzamento de fronteiras pode significar a perda da chamada. Além disso supõe-se que o sistema seja totalmente balanceando ($\beta_i = 0$, $1 \leq i \leq 49$).

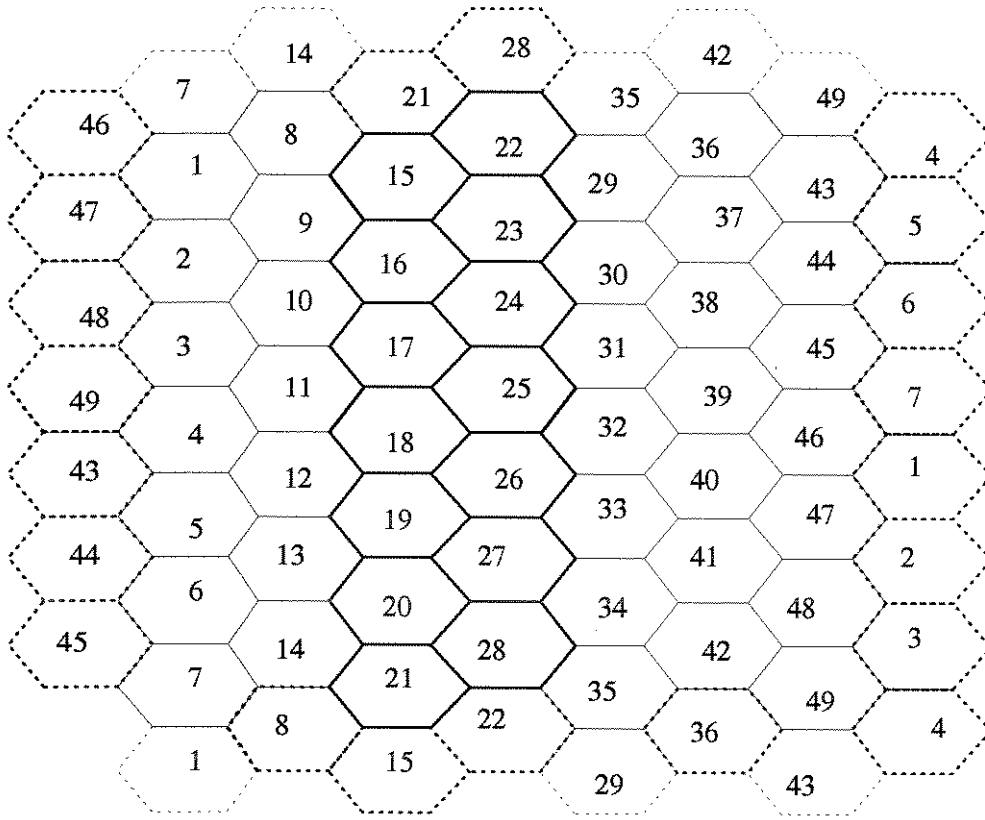


Figura 4.7: Sistema infinito

De acordo com a Figura 4.8 e as suposições feitas, tem-se:

$$\begin{aligned}
 A_i &= \frac{1}{n} A (1 - \gamma) (1 + \beta_i) \\
 &= \frac{A}{49} (1 - \gamma) \quad \forall i = 1, 2, \dots, 49
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

e

$$\begin{aligned}
A2_i[j] &= \frac{1}{6} A2_i \\
&= \frac{1}{6} \frac{\gamma}{(1-\gamma)} A_i \\
&= \frac{1}{6} \frac{A}{49} \gamma, \forall \begin{cases} i = 1, 2, \dots, 49 \\ j = 1, 2, \dots, 6 \end{cases}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

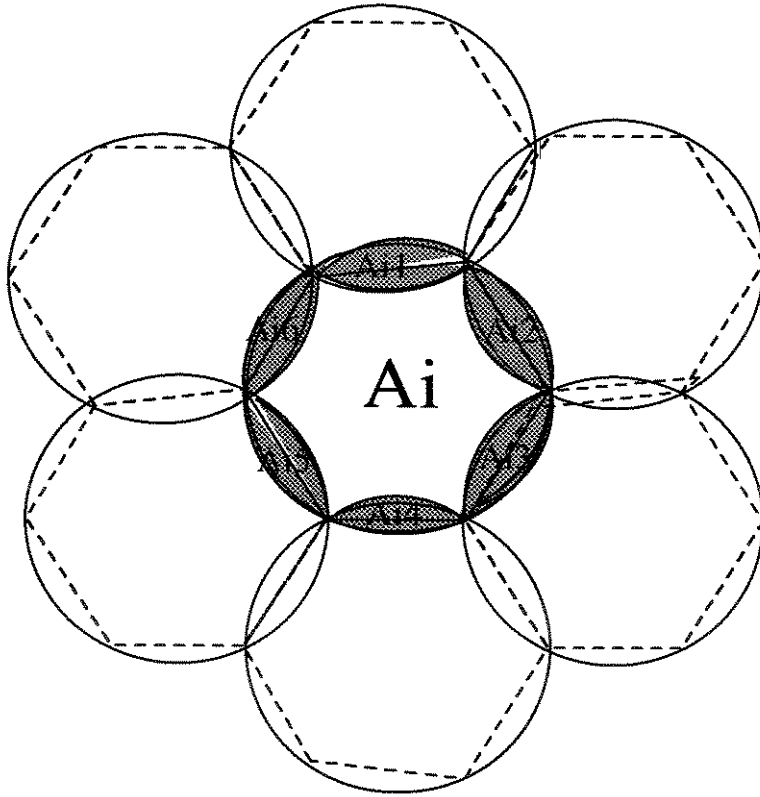


Figura 4.8: Tipos de tráfego num sistema celular infinito

Observe que o tráfego total C_i da célula i será

$$\begin{aligned}
C_i &= A_i + A2_i \\
&= A_i + \sum_{j=1}^6 A2_i[j] \\
&= \frac{A}{49}, \forall i = 1, 2, \dots, 49
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Num sistema infinito e balanceado o tráfego de cada célula é igual à média aritmética do tráfego total do sistema (Equação 4.18). O tráfego flexível possui uma distribuição uniforme entre as seis regiões de intersecção de cada célula, dada pela proporcionalidade de flexibilidade do sistema (Equação 4.17).

O desempenho do sistema é dado pelo bloqueio médio, calculado diretamente da média geométrica das probabilidades de bloqueio do tráfego fixo e flexível de cada célula do sistema conforme a equação abaixo:

$$\begin{aligned} B_m &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b2_i} A2_i[j] B2_i[j]}{A} \\ &= \frac{(1-\gamma) \sum_{i=1}^{49} B_i + \frac{\gamma}{6} \sum_{i=1}^{49} \sum_{j=1}^6 B2_i[j]}{49} \end{aligned} \quad (4.19)$$

onde

- B_i é a probabilidade de bloqueio do tráfego fixo da célula i ;
- $B2_i[j]$ é a probabilidade de bloqueio da j -ésima região, dentre as seis, do tráfego flexível da célula i .

A simulação deste sistema utiliza as equações (4.16) e (4.17) para a geração de tráfego e posterior cálculo das probabilidades de bloqueio de B_i e $B2_i[j]$.

4.3.2 Sistema Real (Tóquio)

Considere um sistema real como o da Figura 4.9 [17]. Em relação ao sistema ideal o número de células vizinhas às células mais externas é menor do que seis, ou seja, o sistema é limitado nas suas fronteiras.

Uma característica dos sistemas reais é o desbalanceamento do tráfego de cada célula, pois o fluxo de tráfego aumenta da periferia para o centro na hora de maior movimento do sistema. Isto está representado na Figura 4.9 através do Nível de Tráfego (linhas verticais).

Para evitar a interferência de cocanal, um mesmo canal só será alocado a uma outra célula respeitando-se a distância mínima de reuso das células. Como o tráfego das células é não uniforme, o número de canais em cada célula também deverá ser diferente. Para

este sistema, o número total de canais é distribuído em 7 conjunto de canais (padrão de 7 células). O número de canais em cada conjunto é dado pelo perfil de probabilidade de bloqueio que se queira aplicar para o sistema como uma primeira aproximação. Isto será visto na Secção 4.6.

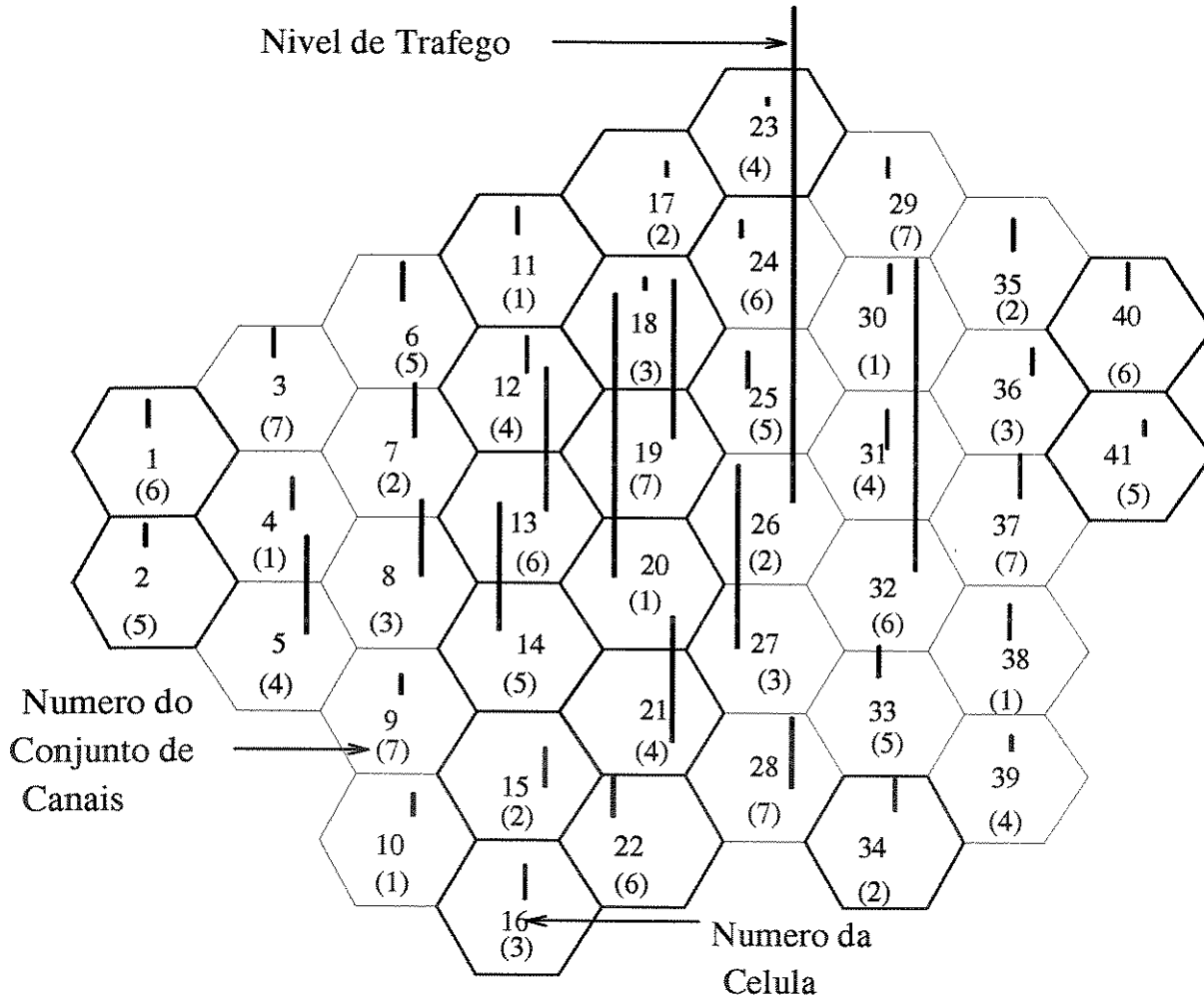


Figura 4.9: Sistema de Tóquio na hora de maior movimento

As equações de tráfego deste sistema são:

$$A_i = (1 - \gamma)C_i \quad (4.20)$$

e

$$A2_i[j] = \frac{\gamma}{b2_i} C_i, \quad \forall j = 1, 2, \dots, b2_i \quad (1 \leq b2_i \leq 6) \quad (4.21)$$

onde

- C_i é o tráfego total da célula i ;
- A_i é o tráfego fixo da célula i ;
- $b2_i$ é o número de células vizinhas à célula i ;
- $A2_i[j]$ é o tráfego flexível disponível na fronteira j da célula i .

O desempenho do sistema é dado pelo bloqueio médio, calculado diretamente da média geométrica das probabilidades de bloqueio do tráfego fixo e flexível de cada célula do sistema conforme a equação (4.22):

$$\begin{aligned} Bm &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b2_i} A2_i[j] B2_i[j]}{\sum_{i=1}^n C_i} \\ &= \frac{(1-\gamma) \sum_{i=1}^{41} C_i B_i + \gamma \sum_{i=1}^{41} \frac{C_i}{b2_i} \sum_{j=1}^{b2_i} B2_i[j]}{\sum_{i=1}^{41} C_i} \end{aligned} \quad (4.22)$$

onde

- B_i é a probabilidade de bloqueio do tráfego fixo da célula i ;
- $B2_i[j]$ é a probabilidade de bloqueio do tráfego flexível disponível na fronteira j da célula i .

A simulação deste sistema utiliza as equações (4.20) e (4.21) para a geração de tráfego e posterior cálculo das probabilidades de bloqueio de B_i e $B2_i[j]$.

4.4 Simulação

De maneira similar ao sistema de pequeno porte descrito no Capítulos 3, a simulação do sistema de grande porte foi implementada usando *SIMULA*, uma linguagem de programação voltada a simulações de eventos discretos [16]. Uma simulação de eventos

discretos descreve um sistema logicamente, originando alterações de estados discretos. A relação com o sistema de comunicação móvel é óbvia: requisição de canais para novas chamadas ou handover e término de chamadas em tempos discretos modificam os estados dos canais. Não ocorre somente alteração de estado nos canais; outros eventos acontecem na EM, EB e CCC. No entanto a principal preocupação é comparar a eficiência da técnica **Variação do Limiar de Bloqueio** com o método tradicional (Alocação Fixa de canais). Em razão disso os programas incluem basicamente as atividades relacionadas com o gerenciamento de canais, porém as simulações podem ser expandidas para incluir outros fenômenos.

Os dados de entrada e saída produzidos são os seguintes:

- Dados de Entrada:

- tráfego total oferecido ao sistema (A);
- proporção de tráfego flexível do sistema (γ);
- número de tentativas do handover;
- *timeout* do handover;
- proporção das chamadas que fazem handover (taxa de handover);
- limiar de bloqueio (L);
- tempo da simulação.

- Dados de saída:

- bloqueio de cada uma das regiões de tráfego flexível da célula i ($B2_i[j]$);
- bloqueio da região de tráfego fixo da célula i (B_i);
- bloqueio de handover da célula i ;
- bloqueio médio da célula i ($Bm[i]$);
- bloqueio médio do sistema (Bm).

Os detalhes da implementação dos dois sistemas de grande porte podem ser vistos nos Apêndices *E* e *F*.

4.5 Validação do Modelo

Os resultados apresentados nesta seção podem ser vistos como uma tentativa para validar os modelos propostos nas seções anteriores. Porém, mais que tudo, eles mostram a intratabilidade das soluções analíticas para sistemas de comunicações móveis.

Somente algumas situações bastante particulares podem fazer uso da fórmula *Erlang-B*. Estas situações são de interesse apenas para a validação dos algoritmos de simulação e foram utilizadas em etapas intermediárias antecedendo a simulação dos fenômenos mais complexos para os quais o uso da fórmula *Erlang-B* é inviável. As situações particulares exploradas fizeram uso tanto da *Alocação Fixa* de canais quanto da utilização da **Variação do Limiar de Bloqueio** e são descritas a seguir:

- na *Alocação Fixa* de canais o handover deve ser evitado;
- na **Variação do Limiar de Bloqueio** as seguintes alternativas podem ser investigadas:
 - fazer limiar $L = N + 1$;
 - não fazer uso da flexibilidade ($\gamma = 0$).

Qualquer situação que não se encaixa em uma das descritas acima implica numa divergência do resultado previsto pela fórmula *Erlang-B*.

4.5.1 Tráfego de Poisson e Fórmula de Erlang-B

Considere o perfil do tráfego como mostrado na Figura 4.10.

Os valores do tráfego e o número de canais fixos produzem o bloqueio indicado, obtido com a fórmula de Erlang-B, se as estações móveis permanecerem na célula de origem durante toda a duração da chamada. Isto é o tráfego de *Poisson* puro, com a distribuição exponencial negativa de tempo entre chegadas de chamadas e duração da chamada. Este perfil é utilizado para validar a geração de tráfego nas simulações, com o modelo proposto na Seção 4.1 para chamadas sem handover. Os resultados são mostrados na Figura 4.11.

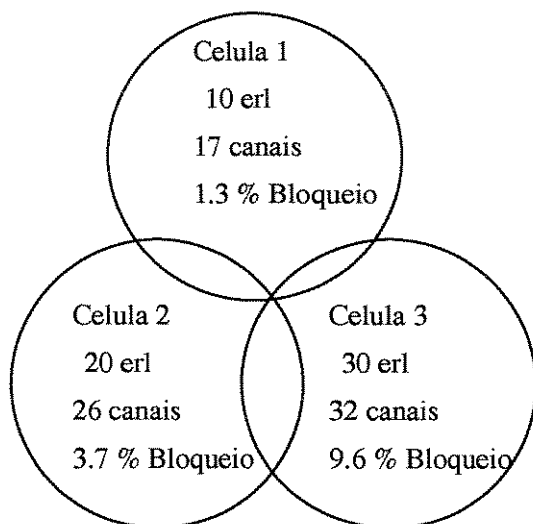


Figura 4.10: Probabilidade de bloqueio usando a fórmula de Erlang-B

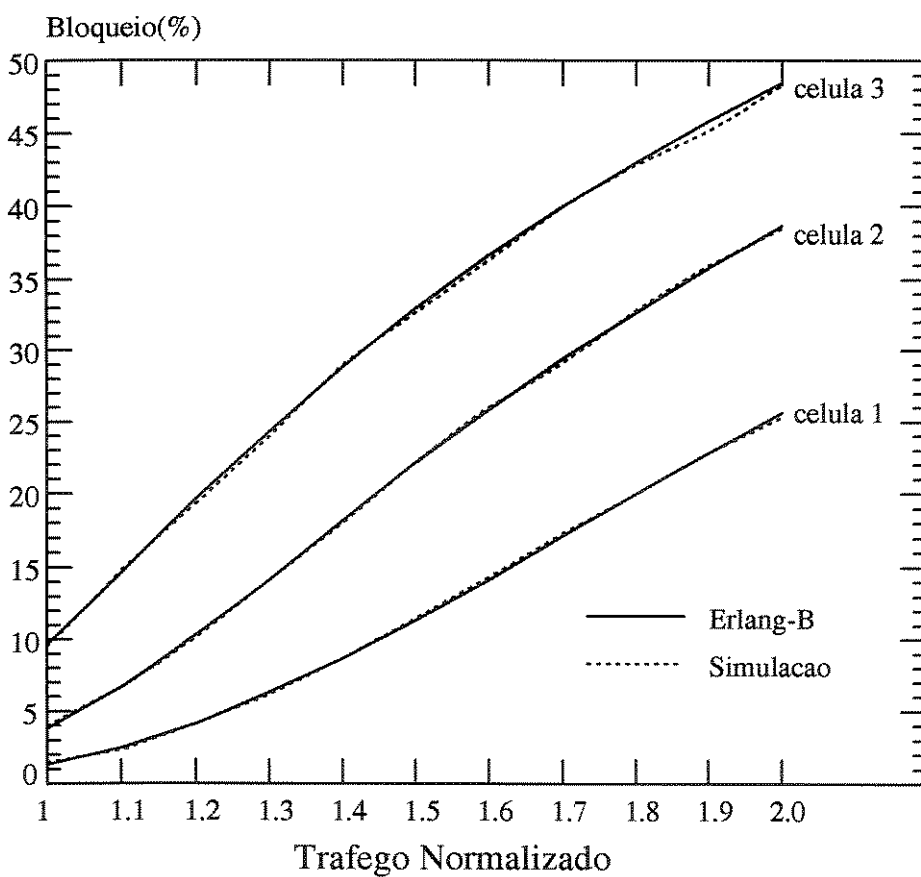


Figura 4.11: Comparação da simulação e fórmula de Erlang-B

A comparação é feita entre a simulação e a fórmula de Erlang-B. O tráfego normalizado de valor *um* corresponde aos níveis de tráfego indicado na Figura 4.10. Eles são incrementados na mesma proporção, até 100 % para valores normalizados de *dois*. A simulação foi feita para simular um tempo de 5 dias.

Estes resultados mostram uma excelente correspondência entre a simulação e a fórmula de Erlang-B.

4.5.2 Alterações no Tráfego das Células Devido ao Handover

Quando o handover é incluído no perfil do tráfego da Figura 4.10, a ocupação do canal é alterada pelas estações móveis que cruzam as fronteiras durante a ligação.

No cálculo analítico através da fórmula de Erlang-B, deve-se levar em consideração a alteração do tráfego devido ao handover. O modelo analítico do tráfego de cada célula após o handover é construído com as seguintes hipóteses:

1. Durante um processo de handover a chamada pode terminar antes do término do mesmo; supõe-se que em 50 % dos casos isto ocorra.
2. Durante um processo de handover o *timeout* pode expirar sem que haja o término do handover ou da chamada; supõe-se que isto está diretamente ligado à probabilidade de bloqueio das células vizinhas (todos os canais ocupados) e da proporcionalidade entre o *timeout* e o tempo de duração média da chamada.
3. O handover ocorre somente na parte não bloqueada do tráfego e é igualmente distribuído entre as duas células vizinhas, ou seja, as duas recebem a mesma quantidade de fluxo de tráfego adicional devido ao handover originado.

De acordo com [14] e as hipótese feitas, o tráfego oferecido para cada célula após o handover é aproximadamente

$$A_{i \text{ pós } HO} = A_i(1 - \frac{f}{2}) + \frac{A_i f}{2} B_j \frac{T_0}{h} + \frac{A_i f}{2} B_k \frac{T_0}{h} + \frac{A_j(1 - B_j) f}{2} + \frac{A_k(1 - B_k) f}{2} \quad (4.23)$$

onde

- A_i , A_j e A_k são os tráfegos das 3 células da Figura 4.10;
- B_i , B_j e B_k são as probabilidades de bloqueio das 3 células da Figura 4.10;
- f é a proporção de chamadas que fazem handover;
- T_0 é o tempo de *timeout* do handover;
- h é o tempo médio de duração da chamada.

Observe que:

- $A_i(1 - \frac{f}{2})$ é a proporção do tráfego original onde não ocorreu handover mais a parte que começou o processo mas não completou devido ao encerramento da chamada antes do término do handover (hipótese 1);
- $\frac{A_i f}{2} B_j \frac{T_0}{h} + \frac{A_i f}{2} B_k \frac{T_0}{h}$ é a proporção do tráfego onde houve a tentativa de handover para as células vizinhas, mas sem sucesso devido a falta de canais disponíveis das mesmas (hipótese 1 e hipótese 2);
- $\frac{A_j(1-B_j)}{2} \frac{f}{2} + \frac{A_k(1-B_k)}{2} \frac{f}{2}$ é a proporção de tráfego originado do handover das células vizinhas (hipótese 1 e hipótese 3).

A Figura 4.12 mostra a diferença entre a fórmula de Erlang-B para A_1 *pósHO*, A_2 *pósHO* e A_3 *pósHO* e a simulação para várias porcentagens de handover.

O valor de 0 % de handover corresponde ao tráfego normalizado 1, da Figura 4.10. Os parâmetros utilizados para a simulação foram:

- tempo simulado de 5 dias;
- tempo médio de duração da chamada de 2 minutos;
- 10 tentativas de handover;
- tempo de *timeout* do handover de 0.5 minutos.

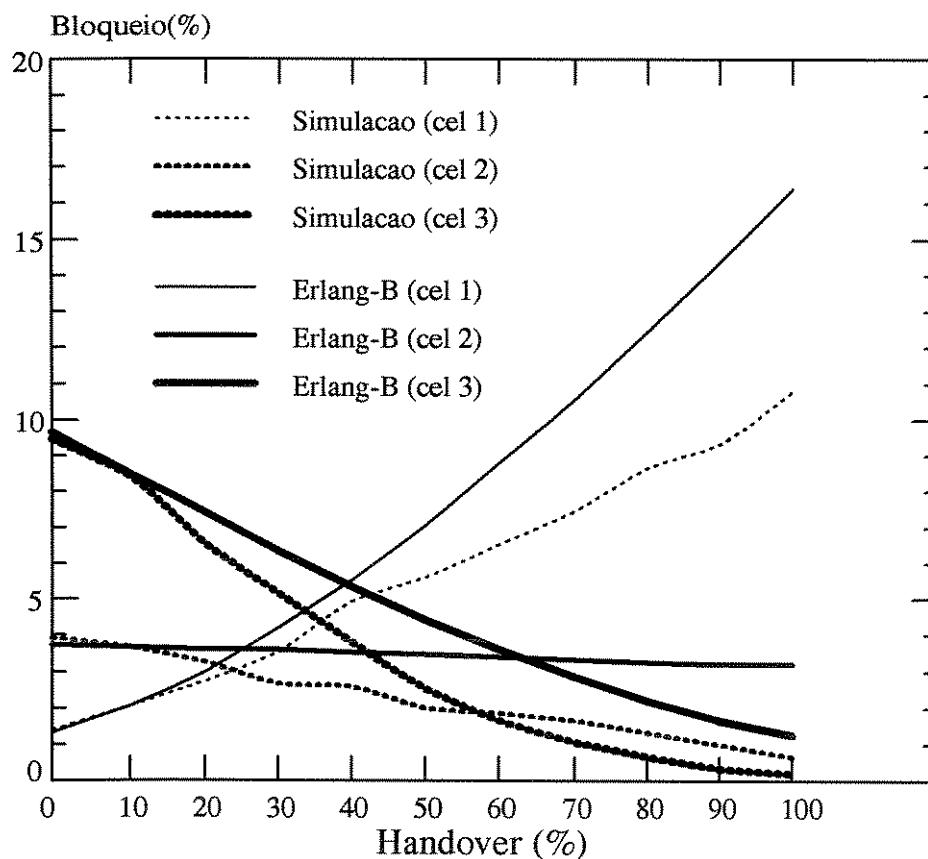


Figura 4.12: Comparação da simulação com handover e fórmula de Erlang-B

Os valores da fórmula de Erlang-B e da simulação divergem à medida que a proporção de handover aumenta. Grande quantidade de tráfego de handover é esperado para sistemas móveis, especialmente quando o tamanho da célula é diminuído para aumentar o reuso de canal. A interação entre as células produzem alterações imprevisíveis no comportamento do handover. A tendência das chamadas sofrerem o processo de handover no início ou fim do período de *timeout*, ou serem bloqueadas, altera-se com a ocupação dos canais na célula que está recebendo o handover. A ocupação do canal e a probabilidade de bloqueio são dependentes do tráfego de cada célula e do tráfego do handover das outras células.

4.5.3 Probabilidade de Bloqueio de Handover

O efeito das tentativas de handover, descrita pela equação (4.6), foi simulado para o sistema ideal da Figura 4.7.

Os seguintes parâmetros foram utilizados para a simulação:

- tempo simulado: 12 horas;
- número de células: 49 (com repetição *infinita*);
- número de canais por célula: 15;
- tráfego por célula: 12.5 erl;
- tempo médio de duração da chamada: 2 minutos;
- proporção das chamadas que fazem handover: 40 %.

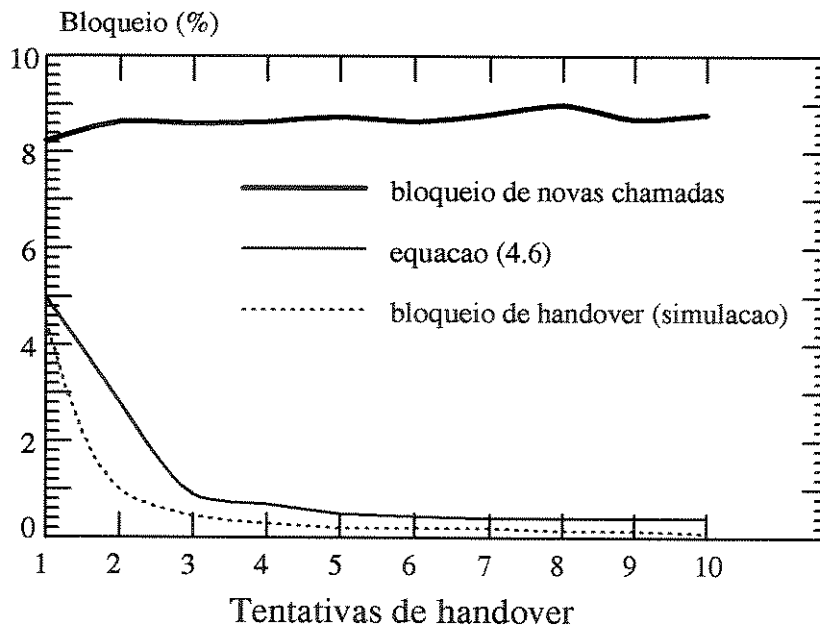


Figura 4.13: Tentativas de handover

A Figura 4.13 mostra uma melhora no bloqueio de handover à medida que o número de tentativa é aumentado de 1 a 10, com um *timeout* fixo de 30 segundos. Na Figura 4.14

o número de tentativas de handover é 3 e os resultados são determinados em função do tempo de *timeout* T_0 .

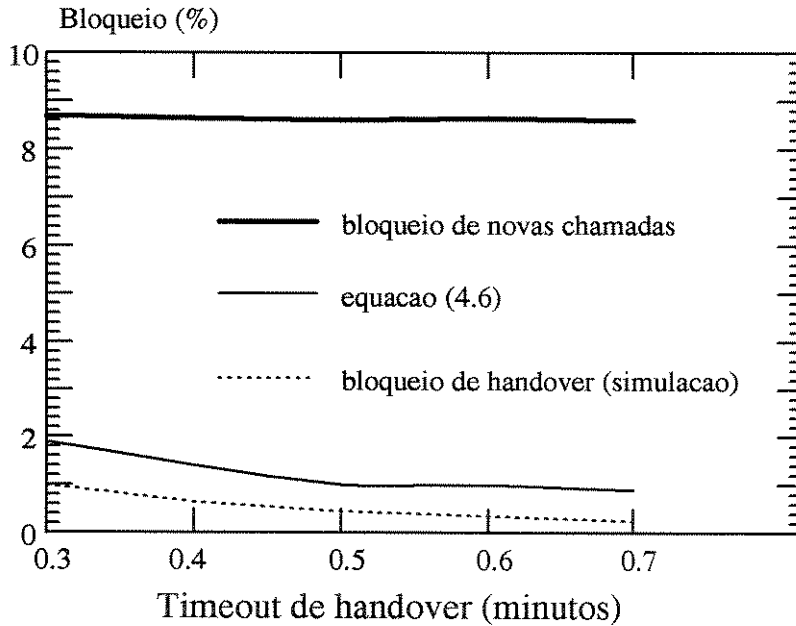


Figura 4.14: Timeout

A equação (4.6) foi obtida assumindo o tráfego de Poisson nas células. Os resultados da Figura 4.13 mostram quão diferente é o tráfego da de Poisson. Isto explica a diferença entre a equação (4.6) e os resultados da simulação.

O comportamento do algoritmo de handover foi melhor do que o esperado. Sem deteriorações significativas nos bloqueios das chamadas, o bloqueio de handover é reduzido a níveis inferiores do que o previsto usando a equação (4.6). Assim, esta equação pode ser usada para obter um limitante superior do bloqueio de handover.

4.6 Resultados do Sistema Ideal (Infinito)

Nesta seção analisa-se o desempenho do sistema de rádio móvel celular, porém de forma ainda idealizada, ao se aplicar a técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio**. A

comparação é sempre feita com relação ao método convencional da alocação de canais (Alocação Fixa).

Os resultados apresentados foram obtidos através da manipulação de A , γ e L . Os outros parâmetros, incluindo os da simulação, são fixos e possuem os seguintes valores:

- tempo simulado: 12 horas;
- número de células: 49;
- número de canais por célula: 15;
- tempo médio de duração da chamada: 2 minutos;
- proporção das chamadas que fazem handover: 40 %;
- tentativas de handover: 10;
- tempo de *timeout*: 30 segundos.

4.6.1 Bloqueio Médio versus Flexibilidade

Em função do que foi visto no Capítulo 3 é razoável supor que para um determinado limiar o bloqueio médio tende a diminuir à medida que a flexibilidade aumenta. Este fato é bastante intuitivo, pois os canais disponíveis podem ser utilizados pelas células vizinhas desde que a alocação dos canais seja realizada na região de intersecção. Sendo assim, quanto maior a área de intersecção (flexibilidade) maior será o uso dos canais disponíveis. Consequentemente, isto proporciona uma otimização na alocação dos canais, resultando na diminuição do bloqueio médio.

Considere agora que para um determinado valor de flexibilidade o limiar varie. Quanto menor o valor de limiar maior é a quantidade de canais que pode ser usada pelas células vizinhas na região de intersecção. Na realidade tende-se ao balanceamento do tráfego e isto ocorre através da alocação de canais nas áreas de intersecção. O balanceamento máximo ocorre quando o valor de limiar é zero, ou seja, o canal utilizado na região de

intersecção pertence à célula com o menor número de canais ocupados. Portanto, isto proporciona um menor bloqueio médio no sistema.

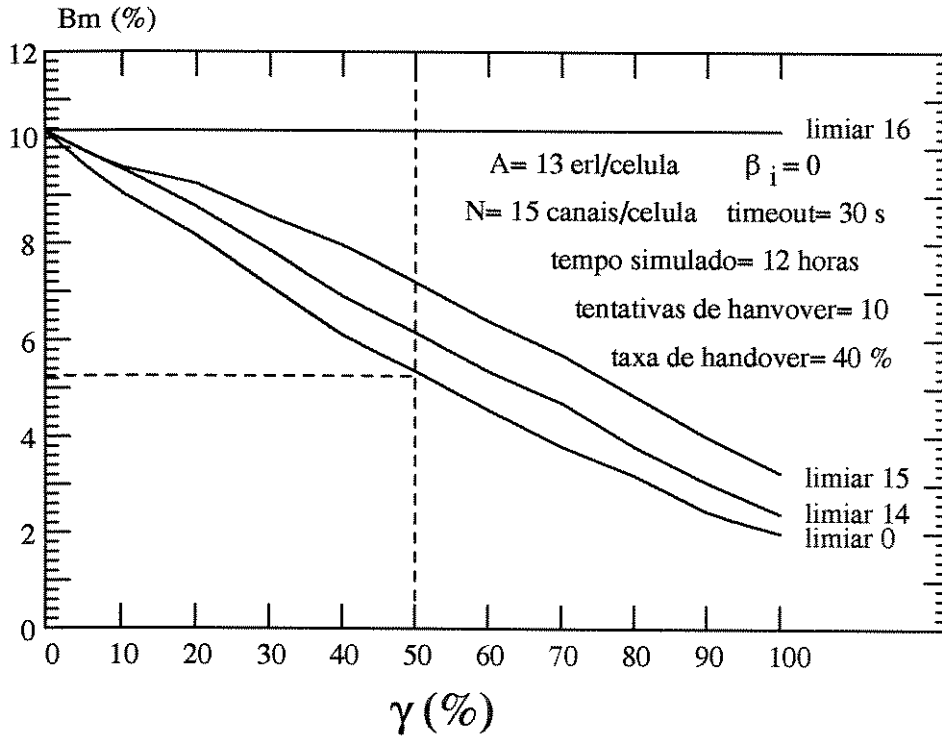


Figura 4.15: Bloqueio Médio X Flexibilidade

A Figura 4.15 valida de maneira quantitativa as análises feitas. A simulação foi realizada com um tráfego de 13 erl por célula. Note que para $\gamma = 0$ a estratégia independe do limiar adotado, o mesmo acontecendo para um limiar $L \geq N + 1$ ($N = 15$). Quando a técnica é aplicada ($L \leq N$), o limiar $L = N$ proporciona o maior ganho relativo. Note que para limiares abaixo de $L \leq N - 1$ os ganhos não são tão grandes quanto ao da curva anterior, mas são bastante significativos. Para se ter uma idéia do ganho obtido com a aplicação da técnica, observe que para $\gamma = 50 \%$ o bloqueio diminui de 10.4 % em $L = 16$ (sem a técnica) para 5.2 % em $L = 0$. Houve uma melhoria de 50 % no sistema com relação ao bloqueio médio. Como dito anteriormente, o valor do bloqueio médio pode

ser obtido com a fórmula de Erlang-B para $L=16$ e também para $\gamma=0$. Isto de fato se verifica na própria simulação.

Apesar do sistema ser inicialmente balanceado, ou seja, todas as células terem as mesmas condições iniciais, o bloqueio médio de cada célula não é o mesmo. Isto decorre da aleatoriedade das chamadas e do handover.

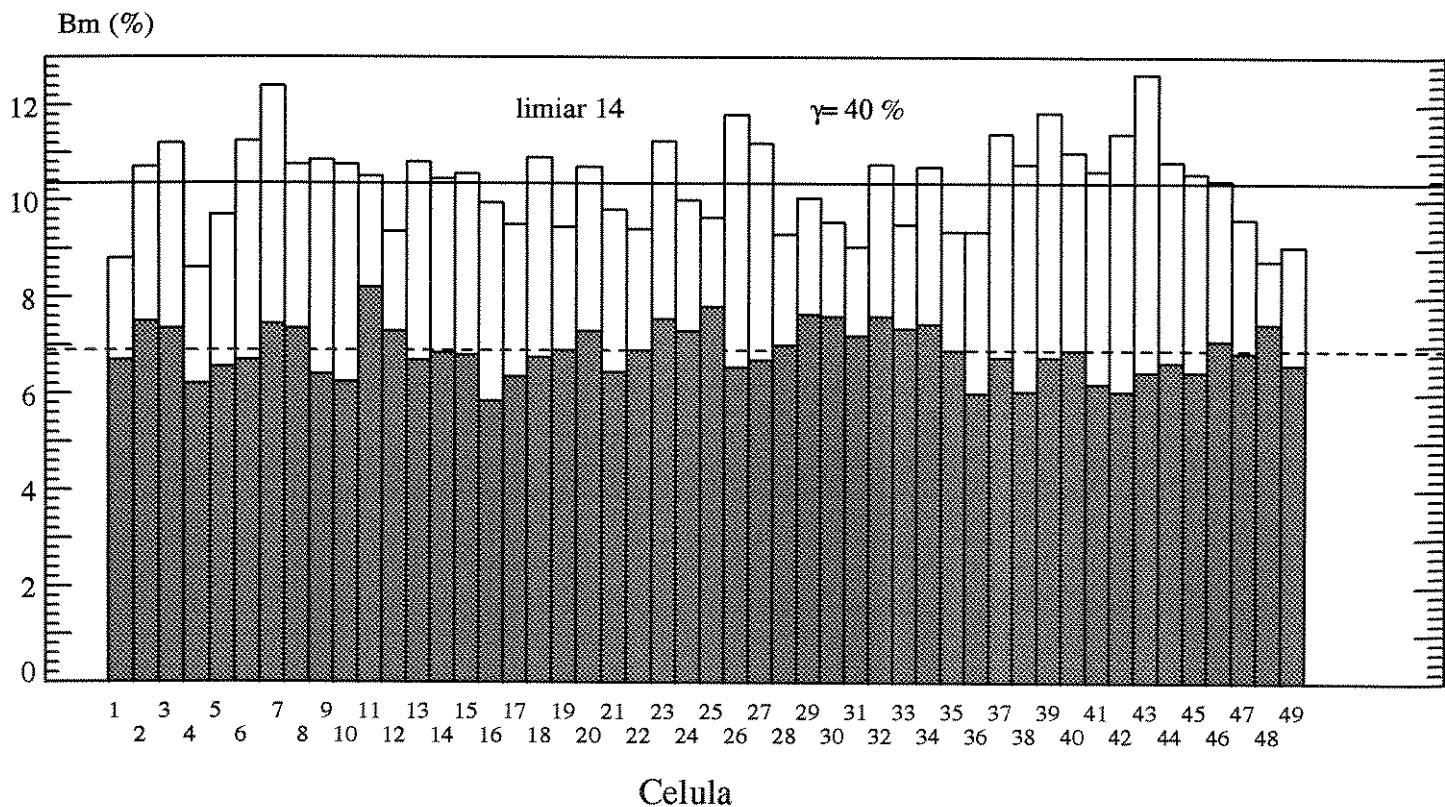


Figura 4.16: Bloqueio médio individual da células

A Figura 4.16 mostra o comportamento de cada uma das células quando é usado o valor de limiar $L=14$ e $\gamma=40\%$. A região hachurada indica o bloqueio médio da célula com $L=14$ e a região em branco o bloqueio médio quando $L=16$ (sem a técnica). As linhas horizontais cheias e tracejadas indicam respectivamente o bloqueio médio do

sistema com $L=16$ e $L=14$. Note que todas as células do sistema tiveram uma melhoria na diminuição do bloqueio médio, umas mais do que outras, apesar do sistema ser balanceado. O bloqueio médio de cada célula foi calculado de acordo com a equação (4.24) baseado na equação (4.19):

$$\begin{aligned} B_m[i] &= \frac{A_i B_i + \sum_{j=1}^6 A_{2i}[j] B_{2i}[j]}{C_i} \\ &= (1 - \gamma) B_i + \frac{\gamma}{6} \sum_{j=1}^6 B_{2i}[j] \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.6.2 Bloqueio Médio versus Tráfego

É obvio que a medida que o tráfego aumenta, o bloqueio médio também cresce. Entretanto, pelo que foi visto na subseção anterior, é evidente a diminuição do bloqueio médio quando o valor de limiar decresce. Consequentemente, para um determinado valor de bloqueio médio, o tráfego por célula pode aumentar quando o valor de limiar é diminuído, otimizando o sistema.

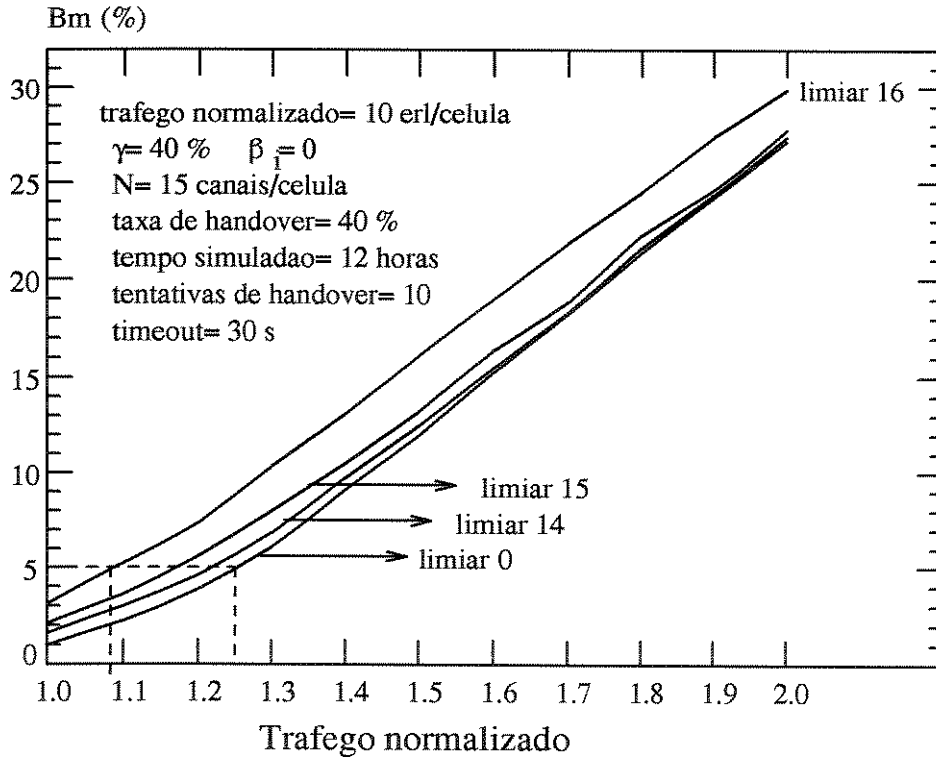


Figura 4.17: Bloqueio Médio x Tráfego Normalizado

A Figura 4.17 indica de forma quantitativa a análise feita. O tráfego normalizado foi de 10 erl/célula com uma flexibilidade de 40 %. Observe que há um ganho significativo na aplicação da técnica, mas as curvas são muito próximas quando o tráfego normalizado ou o bloqueio médio (acima de 10 %) aumenta. Para se ter uma idéia do ganho obtido com a aplicação da técnica, observe que para $Bm = 5\%$ o tráfego por célula aumenta de $1.08 \times 10 = 10.8$ erl em $L = 16$ (sem a técnica) para $1.25 \times 10 = 12.5$ erl em $L = 0$. Isto representa um ganho de 15.7 % na capacidade de escoamento do tráfego por célula. Note que neste caso o ganho, apesar de grande, não é tão significativo pois o tráfego utilizado já é muito grande.

4.7 Resultados do Sistema Real (Tóquio)

Nesta seção analisa-se o desempenho de um sistema de rádio móvel celular mais próximo da realidade do que o analisado na seção anterior, ao se aplicar a técnica **Variação do Limiar de Bloqueio**. Analisa-se o sistema celular da cidade de Tóquio que é mostrado na Figura 4.9. A comparação é feita com relação à Alocação Fixa de canais.

Os resultados apresentados foram obtidos através da manipulação de A , γ e L . Os outros parâmetros, incluindo os da simulação, são fixos e possuem os seguintes valores:

- tempo simulado: 12 horas;
- número de células: 41;
- tempo médio de duração da chamada: 2 minutos;
- proporção das chamadas que fazem handover: 40 %;
- tentativas de handover: 10 ;
- tempo de *timeout*: 30 segundos.

4.7.1 Cálculo do Número do Conjunto de Canais

A Figura 4.9 mostra a divisão dos canais do sistema em 7 conjuntos de canais. Para a determinação do número de canais em cada conjunto utilizou-se a Figura 4.18, que mostra a distribuição de tráfego em cada célula, e a condição do bloqueio máximo em qualquer uma das células do sistema ser menor do que 20 %. O cálculo foi feito usando-se a fórmula *Erlang-B*.

A Figura 4.19 indica o número de canais por conjunto de cada célula para o perfil de bloqueio da Figura 4.20. O propósito de se utilizar um bloqueio tão alto é verificar a eficácia da técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio** nestas condições. Isto é visto nas subseções subsequentes.

Uma conclusão que se pode tirar das Figuras 4.18 a 4.20 é a subutilização dos canais dentro dos conjuntos. Somente as células 5, 14, 19, 20, 21, 26, 27 e 32 tem os seus conjuntos de canais dimensionados de acordo com o tráfego. As 33 células restantes, ou seja, 80.5 % das células do sistema possuem um número de canais superdimensionados para o seu tráfego. Isto decorre da distribuição não uniforme de tráfego, o que não acontecia para sistemas ideais como visto na seção anterior.

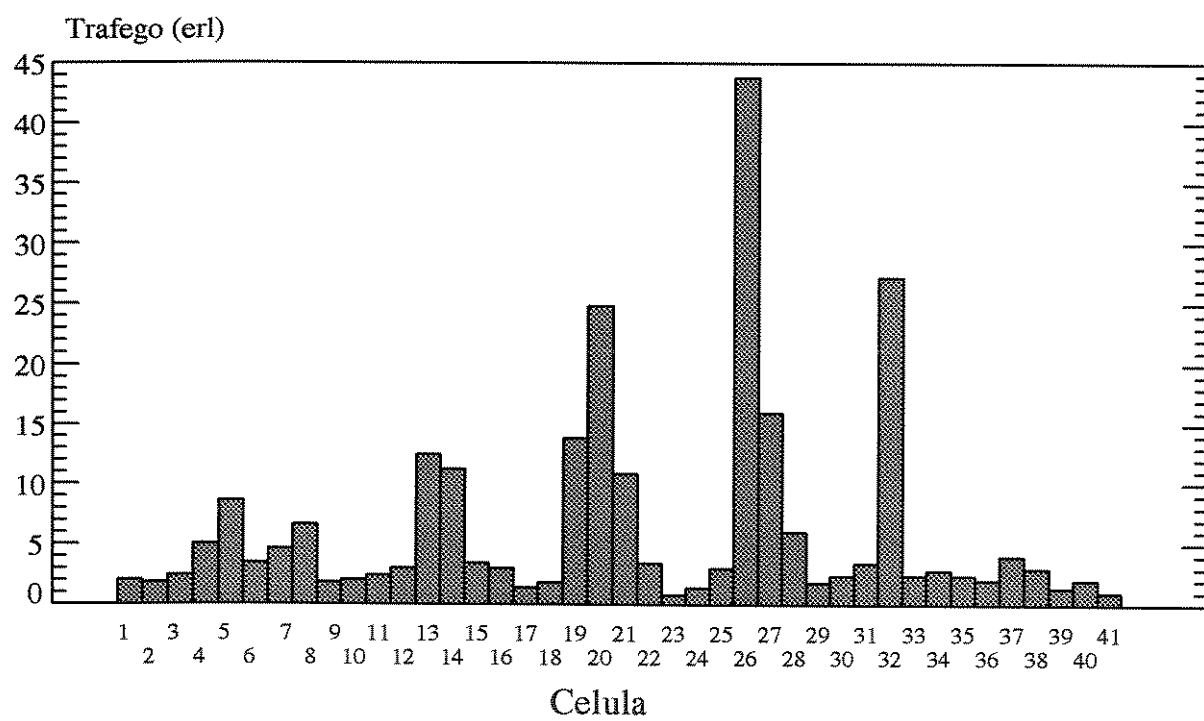


Figura 4.18: Tráfego de Tóquio na hora de maior movimento

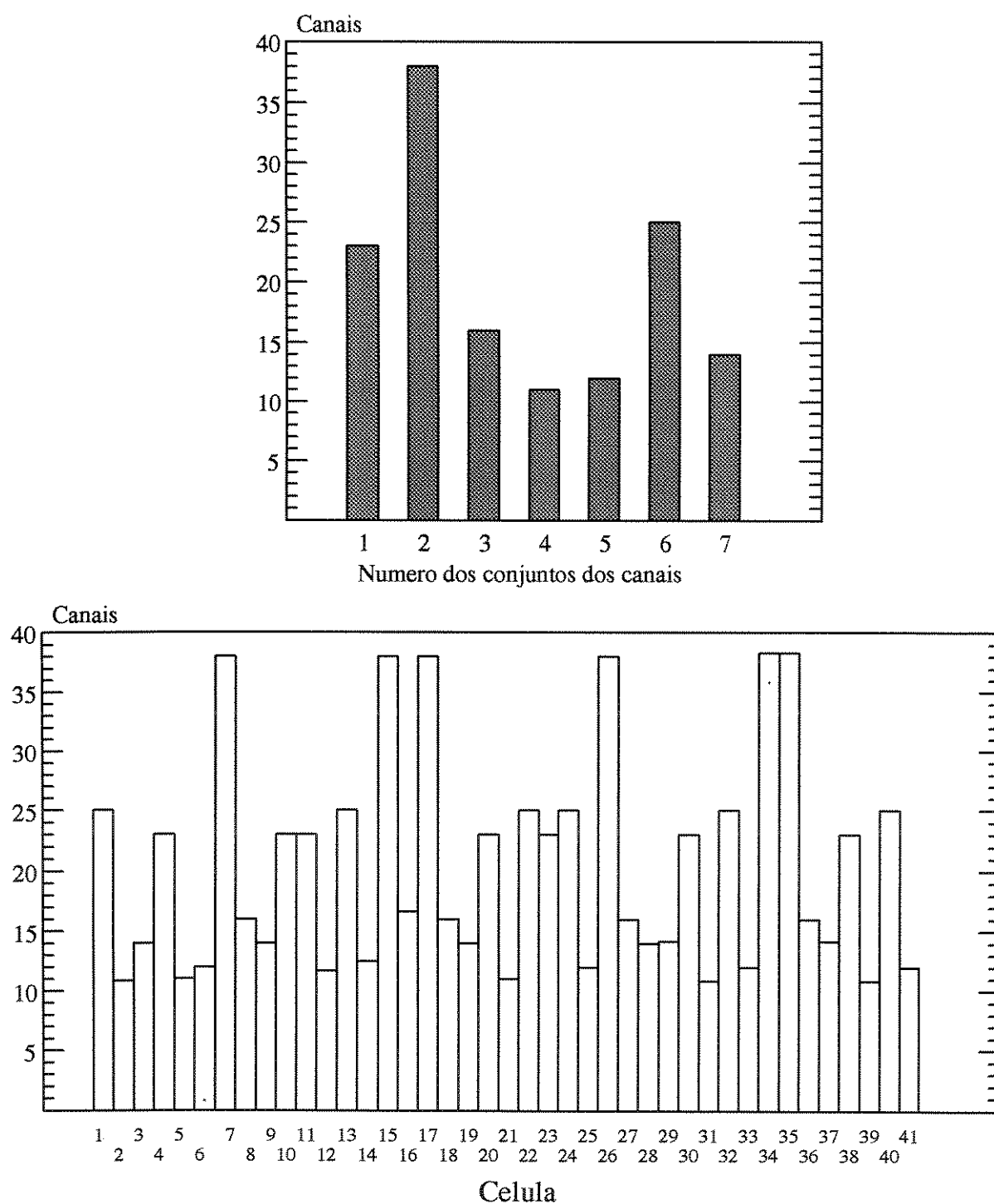


Figura 4.19: Número de canais por célula

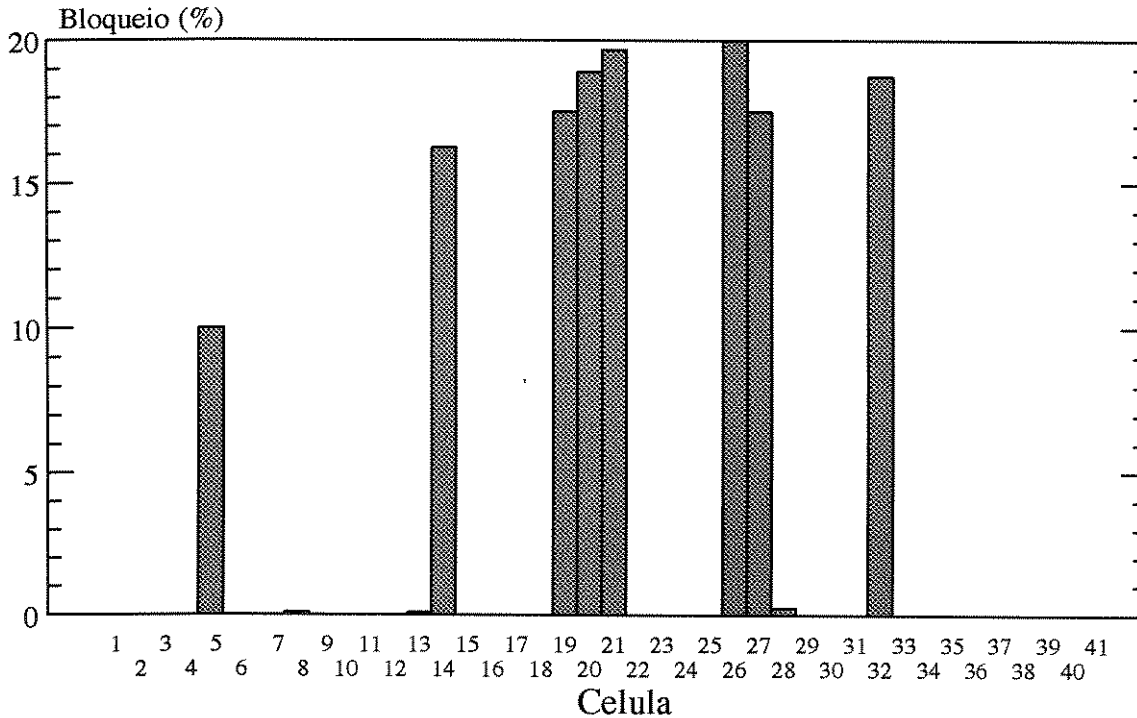


Figura 4.20: Bloqueio calculado pela fórmula de Erlang-B

4.7.2 Bloqueio Médio versus Flexibilidade

As mesmas considerações feitas na Seção 4.6.1 são válidas, ou seja, a aplicação da técnica **Varição do Limiar de Bloqueio** leva ao balanceamento do sistema. Isto se torna mais acentuado quanto menor for o limiar de bloqueio e maior a flexibilidade.

A Figura 4.21 mostra a simulação realizada com a distribuição de tráfego da Figura 4.18 e com o número de canais por conjunto da Figura 4.19. Note que para $\gamma = 0$ a estratégia independe do limiar adotado, o mesmo acontecendo para um limiar $L \geq N + 1$. Como o número de canais em cada conjunto não é o mesmo, N indica o número de canais de cada conjunto. Por exemplo, no conjunto 1 N é igual a 22; no conjunto 2 N é igual a 38 e assim por diante. Quando a técnica é aplicada ($L \leq N$), o limiar $L =$

N proporciona o maior ganho relativo em relação a curva anterior. Nos sistemas reais é razoável estimar em 40 % a flexibilidade; assim o bloqueio médio diminui de 8.1 % em $L = N + 1$ (sem a técnica) para 2.5 % em $L = 0$. Houve uma melhoria de 69.1 % no sistema com relação ao bloqueio médio. Mesmo usando um limiar alto ($L = N$), a melhoria no sistema é significativa pois diminui de 8.1 % para 6.0 % (25.9 % de melhora).

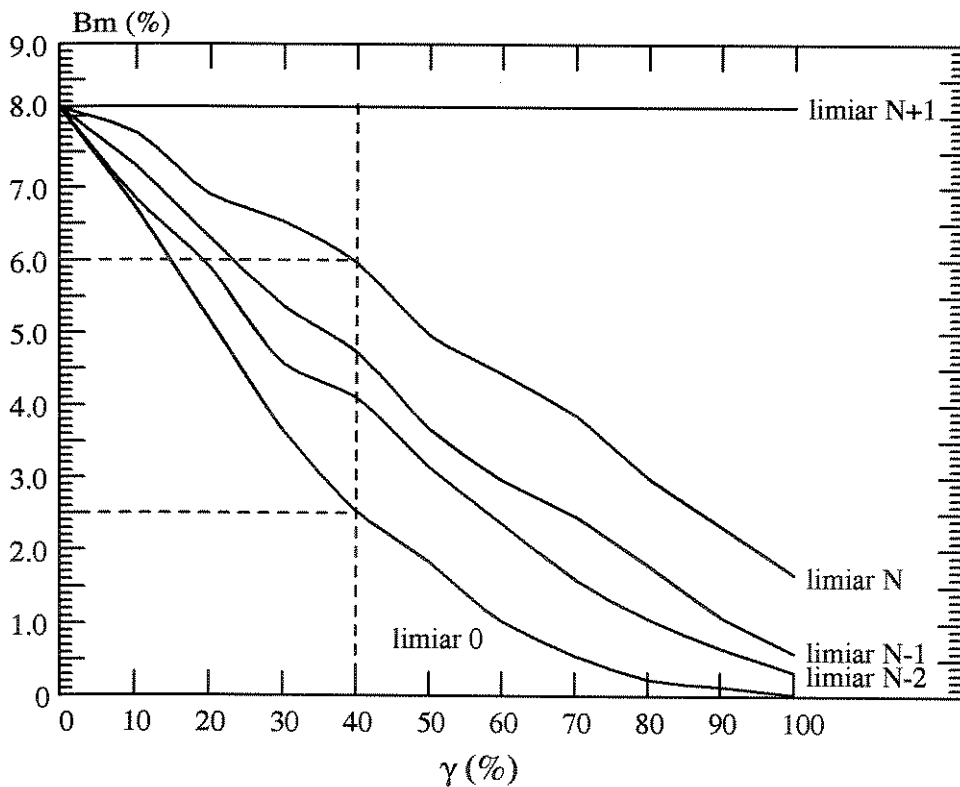


Figura 4.21: Bloqueio Médio x Flexibilidade do Sistema

É inegável que o bloqueio médio do sistema melhora substancialmente. Isto é uma consequência da diminuição do bloqueio nas células. A Figura 4.22 mostra os resultados do bloqueio médio de cada célula para os diversos valores de limiares quando $\gamma = 40$ %,

onde S é o bloqueio médio do sistema.

O bloqueio médio de cada célula foi determinado de acordo com a equação (4.25) baseado na equação(4.22):

$$\begin{aligned} B_m[i] &= \frac{A_i B_i + \sum_{j=1}^{b_{2i}} A_{2i}[j] B_{2i}[j]}{C_i} \\ &= (1 - \gamma) B_i + \frac{\gamma}{b_{2i}} \sum_{j=1}^{b_{2i}} B_{2i}[j] \end{aligned} \quad (4.25)$$

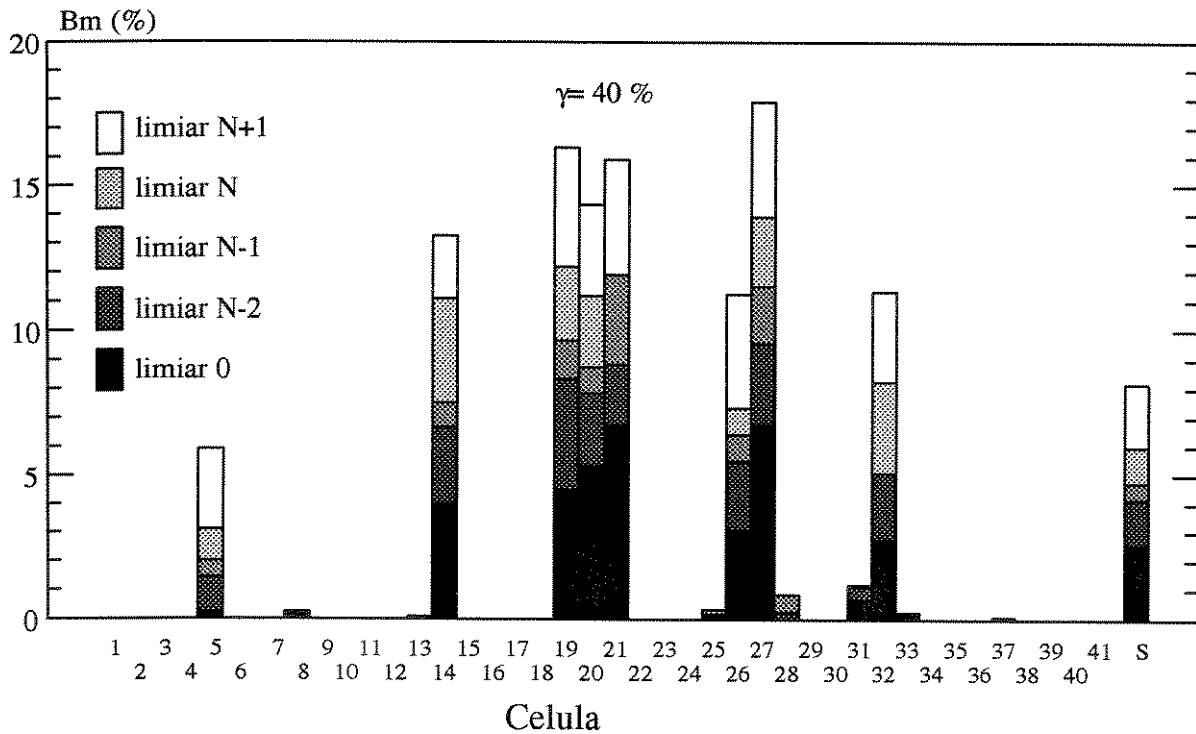


Figura 4.22: Bloqueio Médio x Célula

Observe que para todas as células houve uma melhoria na redução do bloqueio médio acima de 50 %. A Tabela 4.2 mostra a diminuição de bloqueio ao se aplicar a técnica, onde S é o bloqueio médio do sistema.

célula	L= N+1 (Bm)	L= 0 (Bm)	melhoria
5	5.86 %	0.19 %	96.8 %
14	13.24 %	3.95 %	70.2 %
19	16.27 %	4.47 %	72.5 %
20	14.27 %	5.31 %	62.8 %
21	15.90 %	6.69 %	57.9 %
26	11.21 %	3.07 %	72.6 %
27	17.88 %	6.68 %	62.6 %
32	11.25 %	2.71 %	75.9 %
S	8.12%	2.51 %	69.1 %

Tabela 4.2: Redução do bloqueio médio

4.7.3 Bloqueio Médio versus Tráfego

A Figura 4.23 descreve o comportamento do sistema quando $\gamma = 40\%$ e o tráfego normalizado aumenta. Observe que há um ganho significativo na aplicação da técnica, mas as curvas são muito próximas entre valores de limiares consecutivos. Para se ter uma idéia do ganho obtido com a aplicação da técnica, note que para $Bm = 8\%$ o tráfego por célula aumenta de 1.0 em $L = N + 1$ (sem a técnica) para 1.26 em $L = 0$. Isto representa um ganho de 26 % na capacidade de escoamento do tráfego por célula.

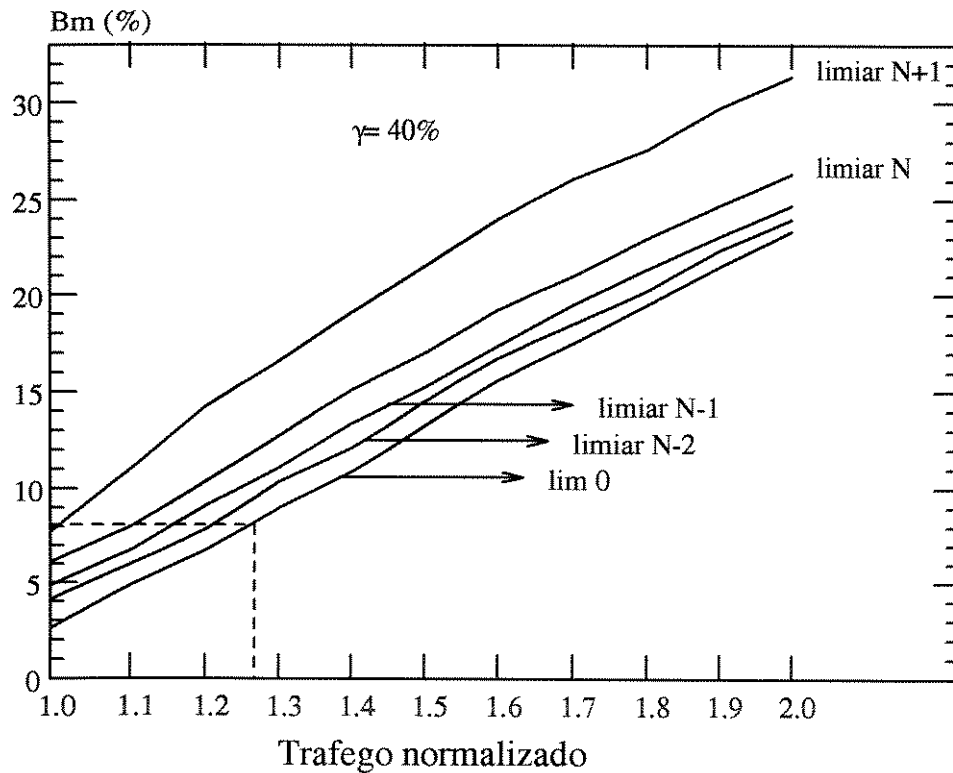


Figura 4.23: Bloqueio Médio x Tráfego Normalizado

4.8 Conclusão

Os resultados obtidos com o uso da técnica **Variação do Limiar de Bloqueio** foram melhores do que a expectativa no que se refere ao bloqueio médio do sistema. Uma propriedade interessante da técnica é o aproveitamento dos canais subutilizados das células nas regiões de tráfego flexível. Como a distribuição de tráfego das células no sistema é não uniforme, não há otimização na alocação fixa de canais para as células. A **Variação do Limiar de Bloqueio** procura otimizar os canais disponíveis utilizando as regiões de tráfego flexível, contribuindo para a redução do bloqueio médio do sistema.

Capítulo 5

Conclusões

O 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 complicar o processo de controle. Esta 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 analisada nesta tese utiliza o *tráfego normal* nas fronteiras entre células, que tem uma comunicação adequada com mais de uma estação rádio base.

Através de cálculos geométricos simples foi possível estimar a proporção de *tráfego flexível* para ser encaminhado para uma ou outra célula. De fato, estudos mais rigorosos [9] mostram que 40 % do tráfego total de uma célula pode ser considerado como disponível para *encaminhamento alternativo*.

A idéia da técnica analisada é baseada da *Directed Retry* [13] ou *ARB* [9] onde o tráfego flexível de uma determinada 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 disso, define-se um *limiar de bloqueio* menor ou igual a 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 ocorrerá o desvio de *tráfego flexível* para outra célula, pois a célula jamais alcançará o estado em que $N+1$ canais estão bloqueados. Para $L = N$ a estratégia proposta coincide com a *Directed Retry* e para $0 \leq L < N$ melhores resultados são esperados.

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 $N-1$. A 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 mas, ao contrário é bastante melhorada.

5.1 Considerações Finais

Os resultados obtidos com a técnica da **Variação do Limiar de Bloqueio** não levaram em consideração os efeitos da *interferência de canal adjacente e co-canal*. É possível estimar a probabilidade da *interferência de canal adjacente* com algumas alterações no modelo de simulação utilizado para sistemas de *comunicações móveis de grande porte*. Entretanto quanto à *interferência de co-canal* a situação é bem diferente. Apesar do cuidado quanto à distância mínima para a reutilização de canais é evidente que há um aumento na probabilidade da ocorrência da *interferência de co-canal*. Para calcular esta probabilidade o modelo de simulação em questão teria que ser outro. Este modelo seria baseado nas equações de transmissão do sinal conjuntamente com as equações de tráfego.

Nos sistemas de comunicações móveis as regiões de intersecção podem comportar *duas ou mais* células. Além disso essas regiões mudam devido a propagação de rádio ser variável, tanto no espaço como no tempo.

5.2 Trabalhos Futuros

Um trabalho interessante e completo seria a simulação das *Técnicas de Melhoria de Desempenho de Tráfego* descritas no Capítulo 2 integradas com as considerações feitas na seção anterior. Estas técnicas poderiam ser simuladas isoladamente ou mescladas às técnicas existentes (*divisão de células + alocação híbrida de canais + variação do limiar de bloqueio*) para a determinação da maior eficiência quanto à utilização de canais.

É possível ainda gerar um pacote *software de simulação* onde a maioria dos fenômenos envolvidos poderiam ser levados em consideração:

- interferências de canal adjacente;
- interferências de co-canal;
- área de cobertura;
- handover, etc.

Dados os parâmetros de entrada, tais como:

- área de cobertura;
- probabilidade de interferências de canal adjacente;
- probabilidade de co-canal;
- tentativas de handover, etc.

O programa determinaria o padrão de células e o número de canais por células para quaisquer das técnicas de alocação de canais adotados.

Apêndice A

Fluxograma para Uma Célula

A.1 Programa Principal

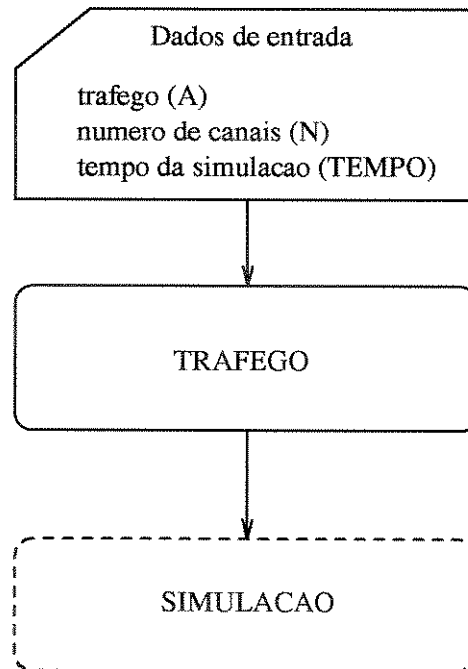


Figura A.1: Programa principal do sistema para uma célula

A.1.1 Descrição dos Blocos

Dados de Entrada: Este bloco implementa a interação com o usuário, onde são fornecidos os parâmetros de entrada.

TRAFEGO: Este bloco implementa os fenômenos relacionados ao tráfego como a duração média da chamada ($1/\mu$) e o tempo médio entre chamadas ($1/\lambda$).

SIMULACAO: Neste bloco estão todos os processos relacionados a simulação.

A.2 Tráfego

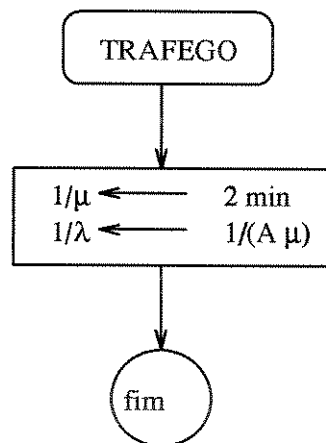


Figura A.2: Procedimento que trata do tráfego de uma célula

A.2.1 Descrição das Instruções

$1/\mu \leftarrow 2 \text{ min}$: Indica que a duração média das chamadas será de 2 minutos.

$1/\lambda \leftarrow 1/(A \mu)$: Indica o tempo médio entre chamadas, calculado em função do tráfego (A) e da duração média da chamada ($1/\mu$).

A.3 Simulação

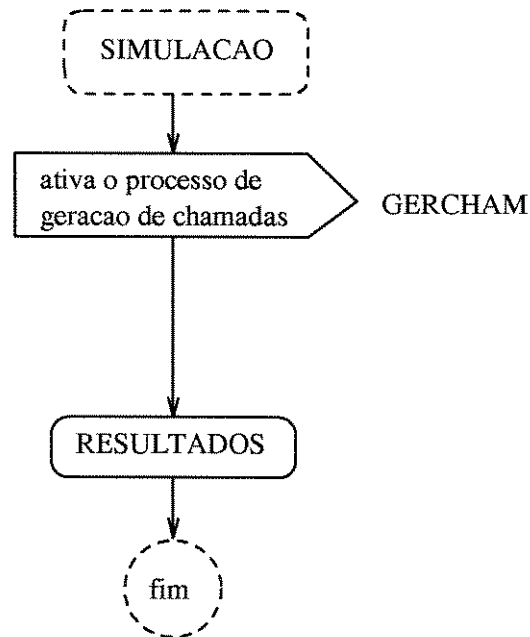


Figura A.3: Processo que trata da simulação do sistema de uma célula

A.3.1 Descrição das Instruções

ativa o processo de geracao de chamadas: Inicia a simulação e o programa ficará neste processo (*GERCHAM*) enquanto durar o tempo de simulação (*TEMPO*).

RESULTADOS: É o procedimento que fornece os resultados da simulação.

A.4 Geração de Chamadas

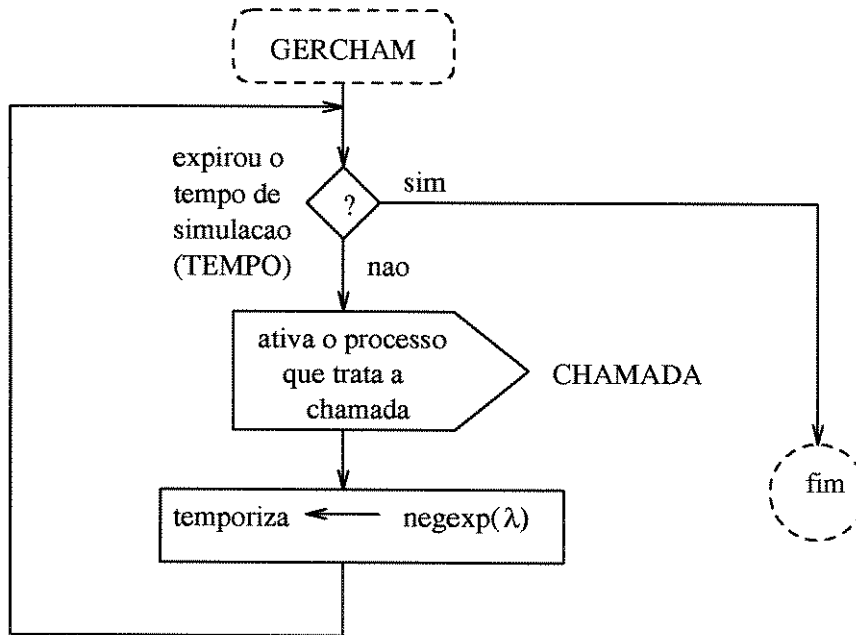


Figura A.4: Processo que trata da geração de chamadas do sistema de uma célula

A.4.1 Descrição das instruções

expirou tempo de simulacao (TEMPO): Indica que enquanto não expirar o tempo de simulação o processo *GERCHAM* gera uma nova chamada, simbolizada pela ativação do processo *CHAMADA*.

ativa o processo que trata a chamada (CHAMADA): Ativa o processo que trata de uma nova chamada. O programa ativa a chamada e retorna para a instrução seguinte, ou seja, o processo *GERCHAM* não espera o processo *CHAMADA* terminar para executar a próxima instrução.

temporiza $\leftarrow \text{negexp}(\lambda)$: Indica que o tempo entre chamadas é dado por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\lambda$.

A.5 CHAMADA

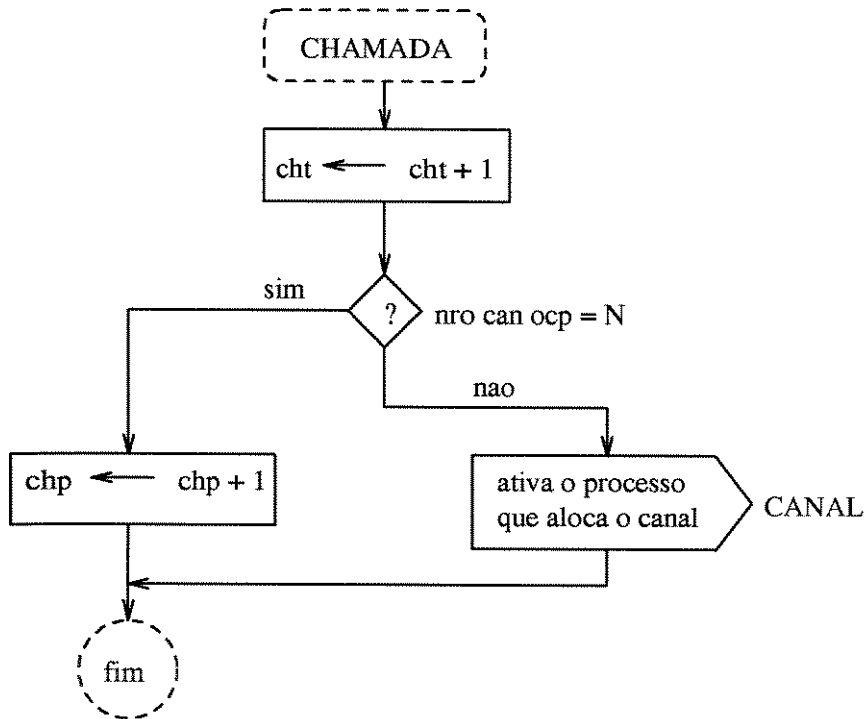


Figura A.5: Processo que trata das chamadas do sistema de uma célula

A.5.1 Descrição das Instruções

cht ← cht + 1: Calcula o número totais de chamadas do sistema.

nro can ocp = N: Este comando de decisão verifica se o número de canais ocupados atingiu o limite (N). Caso tenha atingido o limite a chamada é perdida, senão é alocado um canal para a chamada.

chp ← chp + 1: Calcula o número totais de chamadas perdidas do sistema.

ativa o processo que aloca o canal (CANAL): Este processo trata da alocação do canal para a chamada. Observe que este processo só é ativado quando o número de canais ocupados não atingir o limite (N).

A.6 Canal

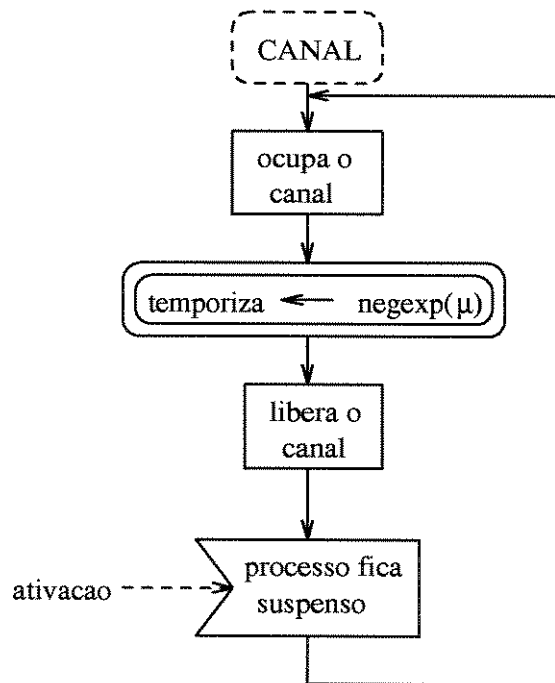


Figura A.6: Processo que trata da alocação de canal do sistema de uma célula

A.6.1 Descrição das Instruções

ocupa o canal: Indica que o processo que cuida deste canal, dentre os N , está ocupado.

temporiza ← negexp(μ): Indica que a duração da chamada ou ocupação do canal é dada por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\mu$.

libera o canal: Indica que o canal está livre, ou seja, pode ser alocada para uma nova chamada.

processo fica suspenso: Indica que o processo fica suspenso (inativo) até que ele seja ativado por uma nova chamada (processo *CHAMADA*). Note que o processo de

CANAL só termina quando a simulação encerra a execução. Além disso como há N canais teremos também N processos de *CANAL*.

A.7 Resultado

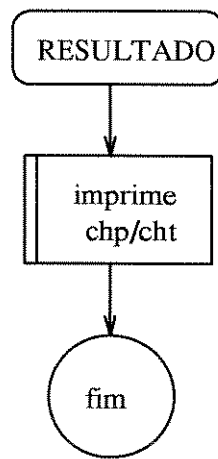


Figura A.7: Procedimento que trata do resultado do sistema de uma célula

A.7.1 Descrições das Instruções

imprime chp/cht: Imprime o bloqueio das chamadas, onde *chp* são as chamadas perdidas e *cht* são as chamadas totais.

Apêndice B

Fluxograma do Modelo 1

B.1 Programa Principal

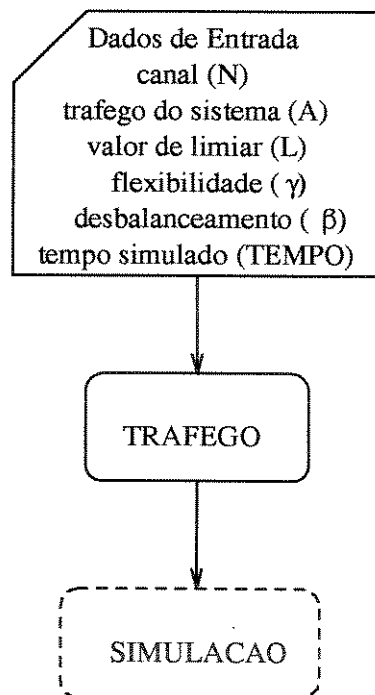


Figura B.1: Programa principal do Modelo 1

B.1.1 Descrição dos Blocos

Dados de Entrada: Este bloco implementa a interação com o usuário, onde são fornecidos os parâmetros de entrada.

TRAFEGO: Este bloco implementa os fenômenos relacionados ao tráfego.

SIMULACAO: Neste bloco estão todos os processos relacionados a simulação.

B.2 Tráfego

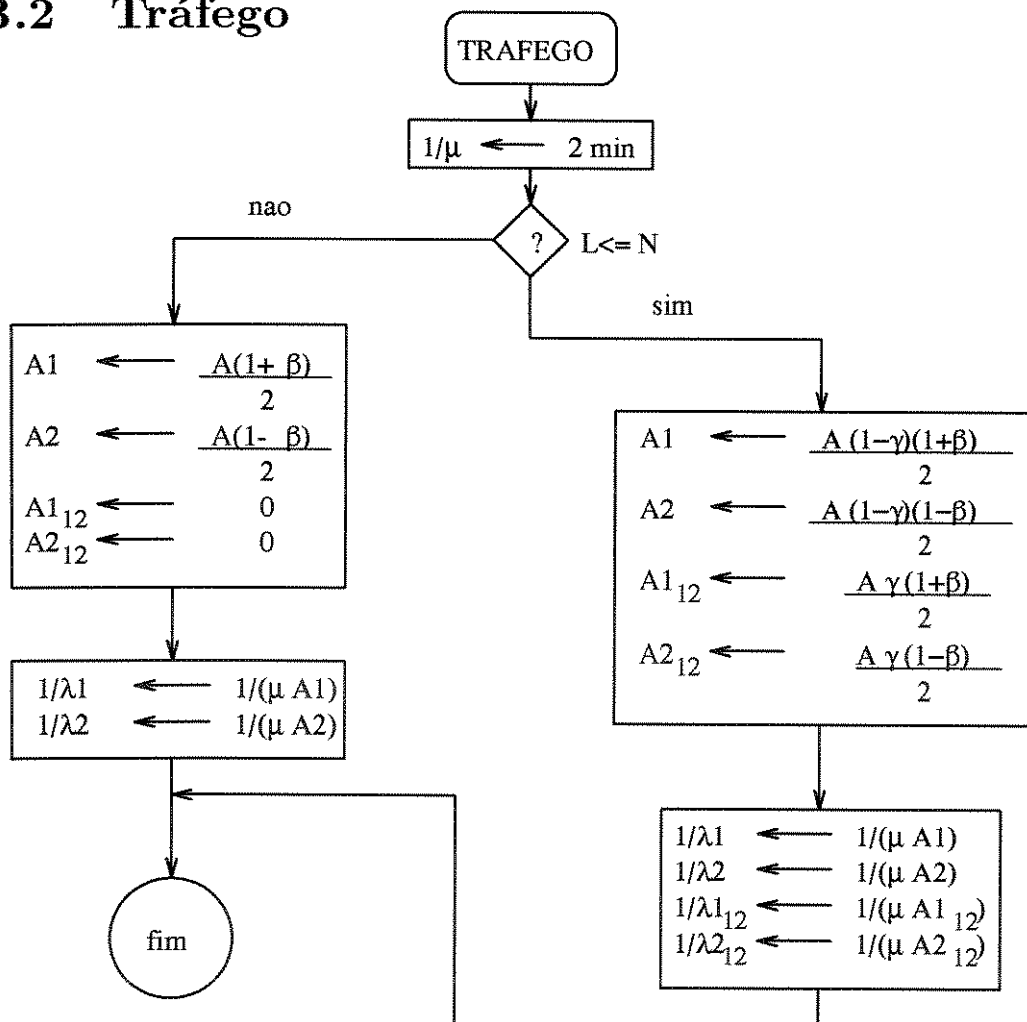


Figura B.2: Procedimento que trata do tráfego do Modelo 1

B.2.1 Descrição das Instruções

$1/\mu \leftarrow 2 \text{ min}$: Indica que a duração média das chamadas será de 2 minutos.

$L \leq N$: Comando de decisão que indica se a técnica da *variação do limiar de bloqueio* será usada ou não.

$A1 \leftarrow \frac{A(1-\gamma)(1+\beta)}{2}$: Indica o tráfego fixo da célula 1.

$A2 \leftarrow \frac{A(1-\gamma)(1-\beta)}{2}$: Indica o tráfego fixo da célula 2.

$A1 \leftarrow \frac{A(1+\beta)}{2}$: Indica o tráfego da célula 1. Note que somente o balanceamento é considerado quando a técnica não é utilizada, ou seja, o sistema considera que todo o tráfego da célula está concentrado na região fixa.

$A2 \leftarrow \frac{A(1-\beta)}{2}$: Indica o tráfego da célula 2. Note que somente o balanceamento é considerado quando a técnica não é utilizada, ou seja, o sistema considera que todo o tráfego da célula está concentrado na região fixa.

$A1_{12} \leftarrow \frac{A\gamma(1+\beta)}{2}$: Indica o tráfego flexível da célula 1.

$A2_{12} \leftarrow \frac{A\gamma(1-\beta)}{2}$: Indica o tráfego flexível da célula 2.

$A1_{12} \leftarrow 0$: Indica que não existe tráfego flexível na célula 1.

$A2_{12} \leftarrow 0$: Indica que não existe tráfego flexível na células 2.

$1/\lambda1 \leftarrow 1/(\mu A1)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego fixo da célula 1.

$1/\lambda2 \leftarrow 1/(\mu A2)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego fixo da célula 2.

$1/\lambda1_{12} \leftarrow 1/(\mu A1_{12})$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego flexível da célula 1.

$1/\lambda2_{12} \leftarrow 1/(\mu A2_{12})$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego flexível da célula 2.

B.3 Simulação

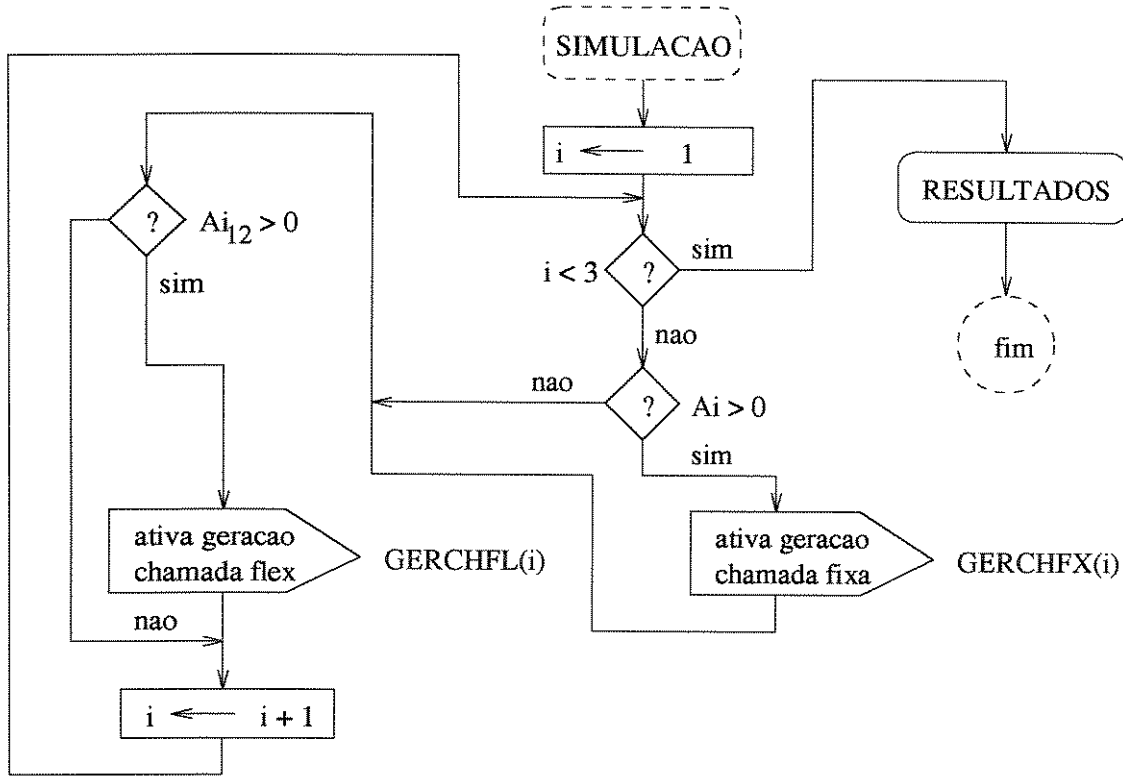


Figura B.3: Processo que trata da simulação do Modelo 1

B.3.1 Descrição das Instruções

$i \leftarrow 1$: Variável que indica a célula e que tem como valor inicial a célula 1.

$i < 3$: Comando de decisão que limita as quantidades de células no sistema em dois.

$A_i > 0$: Comando de decisão para ativar a geração de chamadas fixas através do processo $GERCHFX(i)$ somente se existir tráfego fixo na célula i .

$A_{i12} > 0$: Comando de decisão para ativar a geração de chamadas flexíveis através do processo $GERCHFL(i)$ somente se existir tráfego flexível na célula i .

$i \leftarrow i + 1$: Indica a próxima célula do sistema.

RESULTADOS: É o procedimento que fornece os resultados da simulação. Este procedimento é executado somente quando a simulação termina.

B.4 Geração de Chamadas Fixas

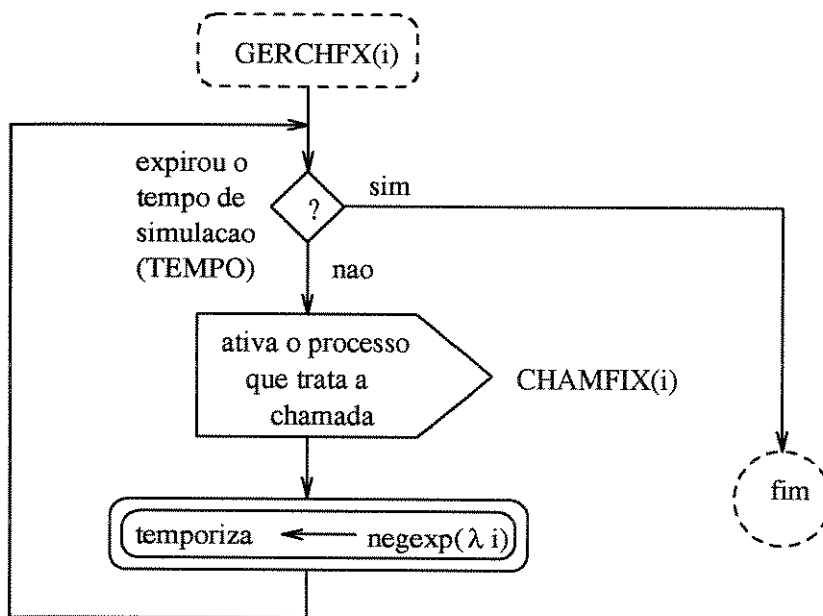


Figura B.4: Processo que trata da geração de chamadas da parte fixa do Modelo 1

B.4.1 Descrição das intruções

expirou tempo de simulacao (TEMPO): Indica que enquanto não expirar o tempo de simulação o processo *GERCHFX(i)* gera uma nova chamada na região fixa da célula *i*, simbolizada pela ativação do processo *CHAMFIX(i)*.

ativa o processo que trata a chamada (CHAMFIX(i)): Ativa o processo que trata de uma nova chamada na região fixa da célula *i*. O programa ativa a chamada e

retorna para a instrução seguinte, ou seja, o processo $GERCHFX(i)$ não espera o processo $CHAMFIX(i)$ terminar para executar a próxima instrução.

temporiza $\leftarrow$ **negexp**(λi): Indica que o tempo entre chamadas na região fixa da célula i é dado por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\lambda i$.

B.5 Geração de Chamadas Flexível

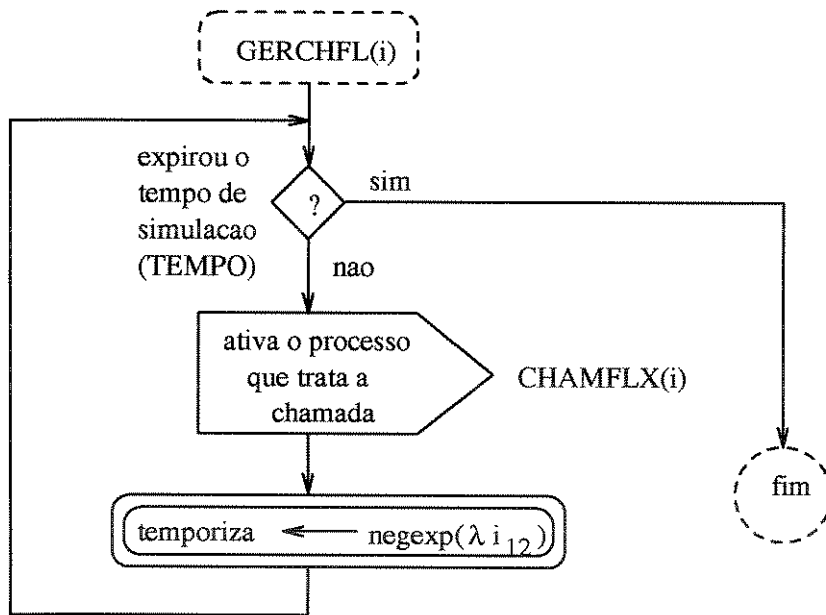


Figura B.5: Processo que trata da geração de chamadas da parte flexível do Modelo 1

B.5.1 Descrição das intruções

expirou tempo de simulacao (TEMPO): Indica que enquanto não expirar o tempo de simulação o processo $GERCHFL(i)$ gera uma nova chamada na região flexível da célula i , simbolizada pela ativação do processo $CHAMFLX(i)$.

ativa o processo que trata a chamada (CHAMFLX(i)): Ativa o processo que trata de uma nova chamada na região flexível da célula i . O programa ativa a chamada e retorna para a instrução seguinte, ou seja, o processo $GERCHFL(i)$ não espera o processo $CHAMFLX(i)$ terminar para executar a próxima instrução.

temporiza $\leftarrow \text{negexp}(\lambda_{i12})$: Indica que o tempo entre chamadas na região flexível da célula i é dado por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\lambda_{i12}$.

B.6 Chamada Fixa

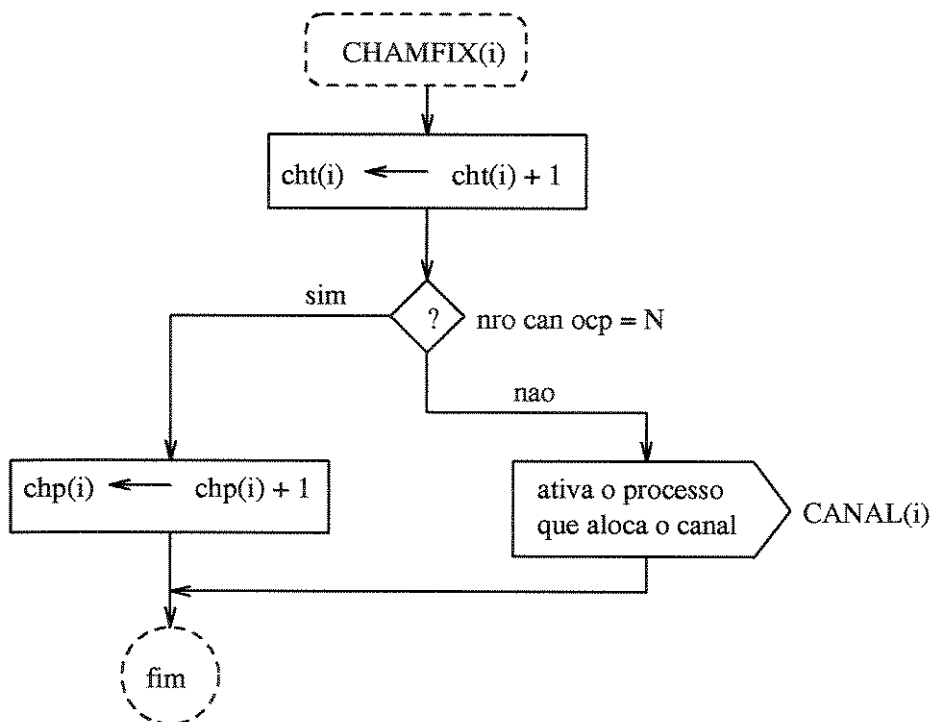


Figura B.6: Processo que trata a chamada da parte fixa do Modelo 1

B.6.1 Descrição das Instruções

cht(i) $\leftarrow$ cht(i) + 1: Calcula o número totais de chamadas fixas da célula i .

nro can ocp = N: Este comando de decisão verifica se o número de canais ocupados da célula i atingiu o limite (N). Caso tenha atingido o limite a chamada é perdida, senão é alocado um canal para a chamada.

chp(i) $\leftarrow$ chp(i) + 1: Calcula o número totais de chamadas fixas perdidas da célula i .

ativa o processo que aloca o canal (CANAL(i)): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região fixa da célula i . Observe que este processo só é ativado quando o número de canais ocupados da célula i não atingir o limite (N).

B.7 Chamada Flexível

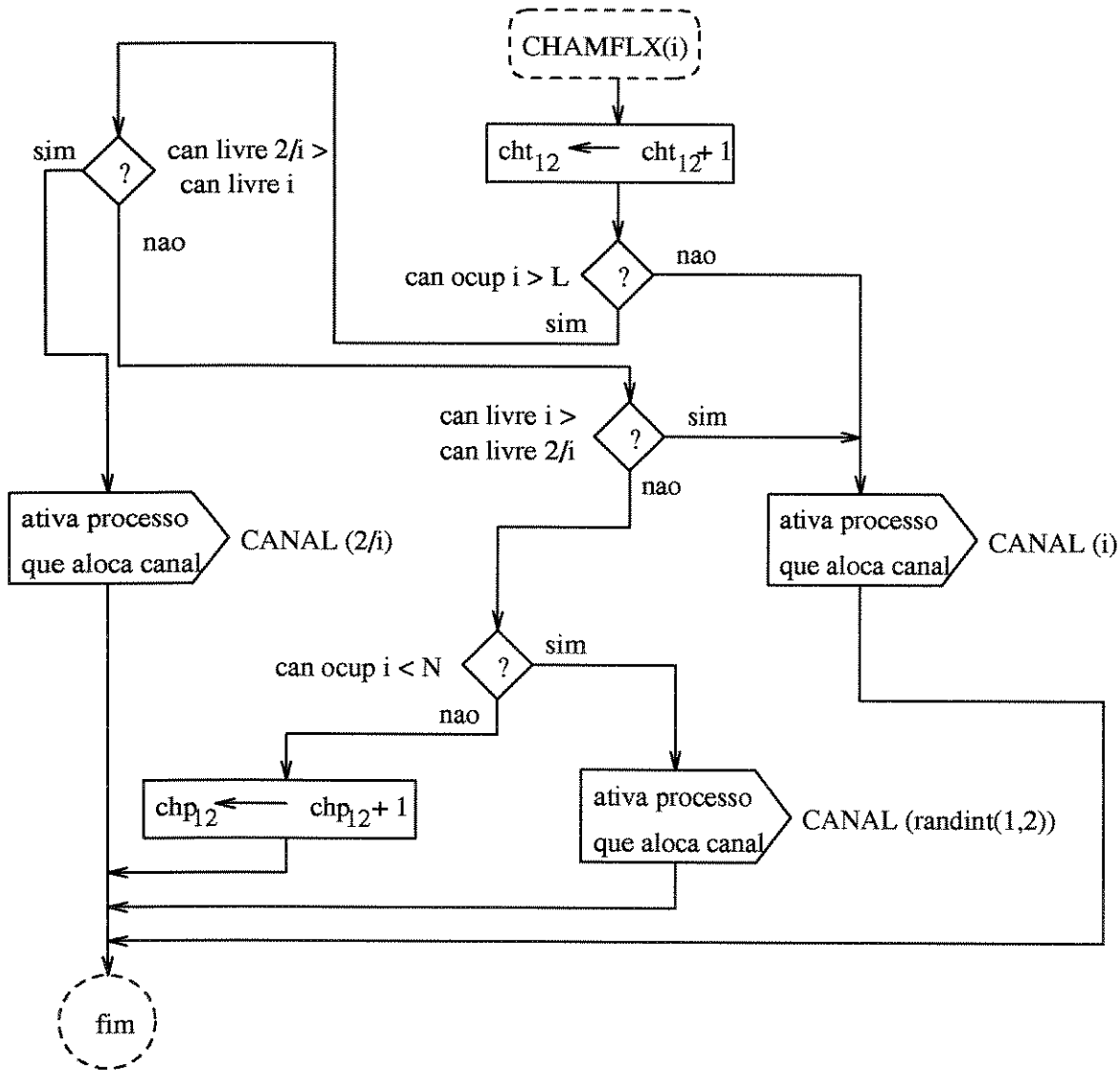


Figura B.7: Processo que trata a chamada da parte flexível do Modelo 1

B.7.1 Descrição das Instruções

$cht_{12} \leftarrow cht_{12} + 1$: Calcula o número totais de chamadas flexíveis.

can ocup $i \geq L$: Comando de decisão que verifica se o número de canais ocupados da célula i é maior ou igual ao valor de limiar L . Observe que quando o número de canais ocupados for menor do que L a *variação do limiar de bloqueio* não é usada.

ativa processo que aloca canal (CANAL(i)): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região flexível da célula i .

can livre $2/i > \text{can livre } i$: Comando de decisão que verifica se o número de canais livres da célula $2/i$ ($i = 1 \text{ ou } 2$) é maior do que o da célula i .

ativa processo que aloca canal (CANAL($2/i$)): Este processo trata da alocação do canal da célula $2/i$ ($i = 1 \text{ ou } 2$) para a chamada originada na região flexível da célula i . Note que a alocação do canal está sendo realizada na célula diferente daquela onde foi originada a chamada.

can livre $i > \text{can livre } 2/i$: Comando de decisão que verifica se o número de canais livres da célula i ($i = 1 \text{ ou } 2$) é maior do que o da célula $2/i$.

can ocup $i < N$: Comando de decisão que verifica se o número de canais ocupados da célula i é menor do que o número totais de canais (N). Na realidade este comando de decisão verifica se as duas células estão com todos os seus N canais ocupados, neste caso o número de canais livres da célula i também seria igual ao número de canais livres da célula $2/i$, ou seja, 0 canais livres.

ativa processo que aloca canal (CANAL(randint(1,2))): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região flexível da célula i , onde *randint(1,2)* é uma função que tem uma distribuição uniforme entre os inteiros 1 e 2 . Isto indica que a alocação do canal pode ocorrer tanto na célula 1 ou 2 com a mesma probabilidade.

chp₁₂ $\leftarrow$ chp₁₂ + 1: Calcula o número totais de chamadas flexíveis perdidas.

B.8 Canal

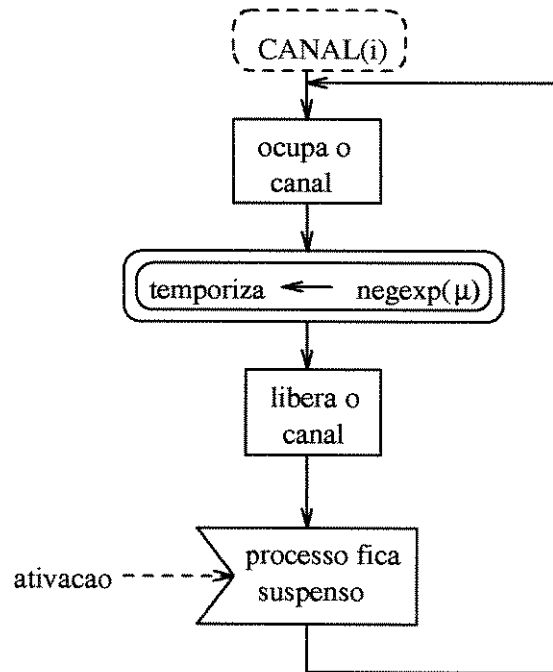


Figura B.8: Processo que trata da alocação de canal do Modelo 1

B.8.1 Descrição das Instruções

ocupa o canal: Indica que o processo que cuida deste canal, dentre os N da célula i , está ocupado.

temporiza ← negexp(μ): Indica que a duração da chamada ou ocupação do canal é dada por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\mu$.

libera o canal: Indica que o canal está livre, ou seja, pode ser alocada para uma nova chamada.

processo fica suspenso: Indica que o processo fica suspenso (inativo) até que ele seja ativado por uma nova chamada (processo $CHAMFIX(i)$ ou $CHAMFLX(i)$). Note que o processo $CANAL(i)$ só termina quando a simulação encerra a execução. Além disso como há N canais teremos também N processos $CANAL(i)$ para cada célula i .

B.9 Resultados

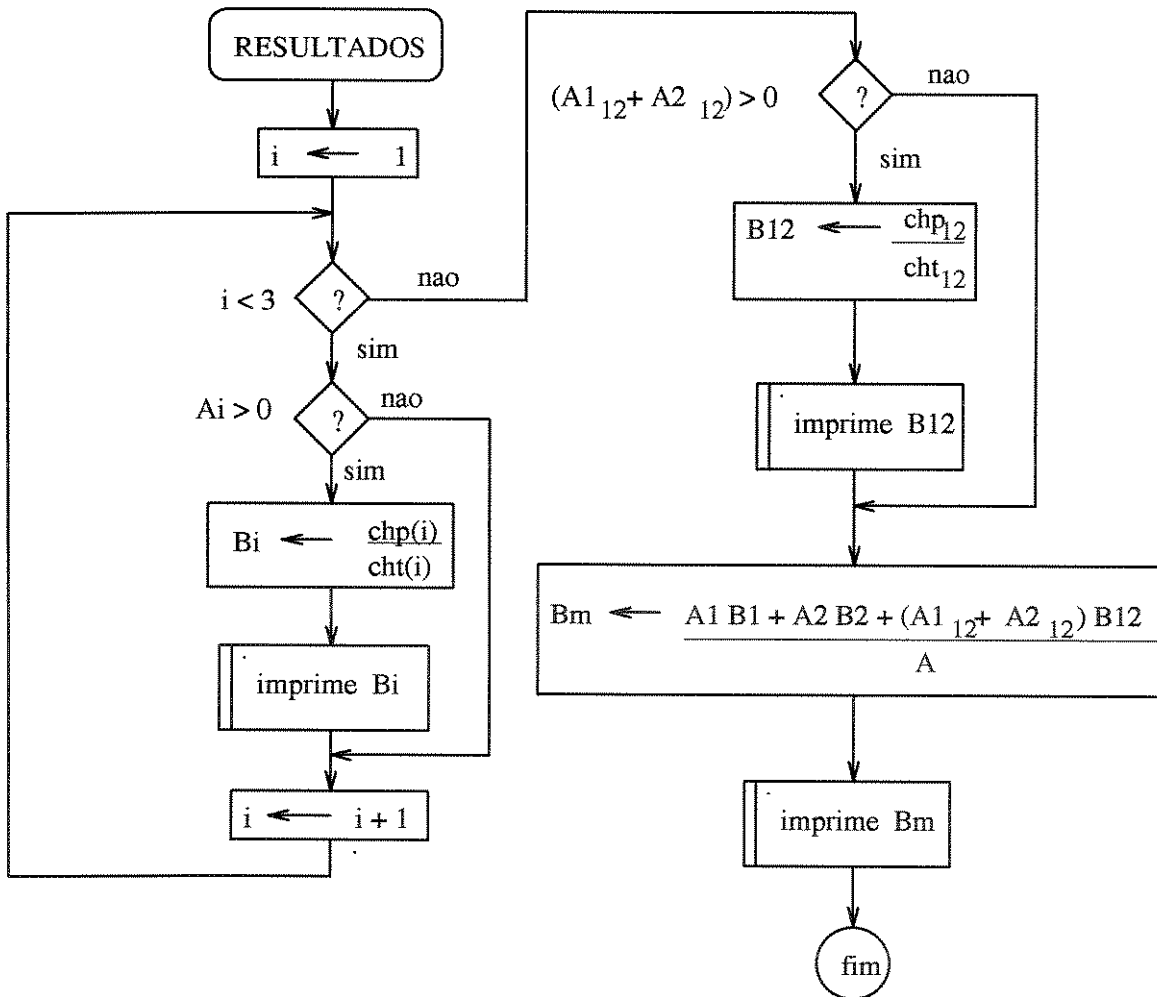


Figura B.9: Procedimento que trata dos resultados do Modelo 1

B.9.1 Descrição das Instruções

i $\leftarrow$ **1**: Variável que indica a célula e que tem como valor inicial a célula 1.

i $<$ **3**: Comando de decisão que limita as quantidades de células no sistema em dois.

Ai $>$ **0**: Comando de decisão que verifica se existe o tráfego fixo da célula *i*.

Bi $\leftarrow \frac{chp(i)}{cht(i)}$: Calcula o bloqueio da região fixa da célula *i*.

imprime Bi: Imprime o resultado do bloqueio da região fixa da célula *i*.

i $\leftarrow$ **i** + **1**: Indica a próxima célula do sistema.

(A1₁₂ + A2₁₂) $>$ **0** : Comando de decisão que verifica se existe tráfego flexível no sistema.

B12 $\leftarrow \frac{chp_{12}}{cht_{12}}$: Calcula o bloqueio flexível do sistema.

imprime B12: Imprime o resultado do bloqueio da região flexível do sistema.

Bm $\leftarrow \frac{A1B1+A2B2+(A1_{12}+A2_{12})B12}{A}$: Calcula o bloqueio médio do sistema.

imprime Bm: Imprime o resultado do bloqueio médio do sistema.

Apêndice C

Fluxograma do Modelo 2

C.1 Programa Principal

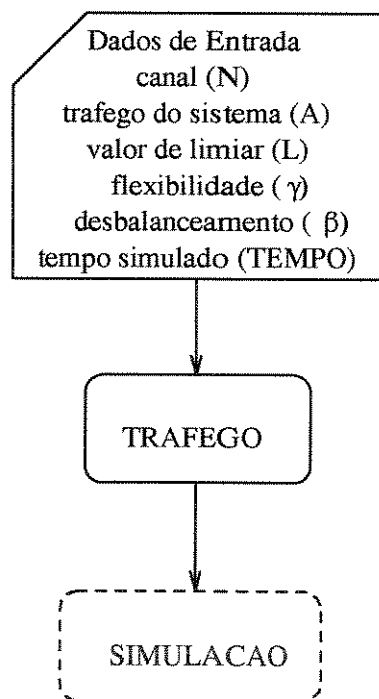


Figura C.1: Programa principal do Modelo 2

C.1.1 Descrição dos Blocos

Dados de Entrada: Este bloco implementa a interação com o usuário, onde são fornecidos os parâmetros de entrada.

TRAFEGO: Este bloco implementa os fenômenos relacionados ao tráfego.

SIMULACAO neste bloco estão todos os processos relacionados a simulação.

C.2 Tráfego

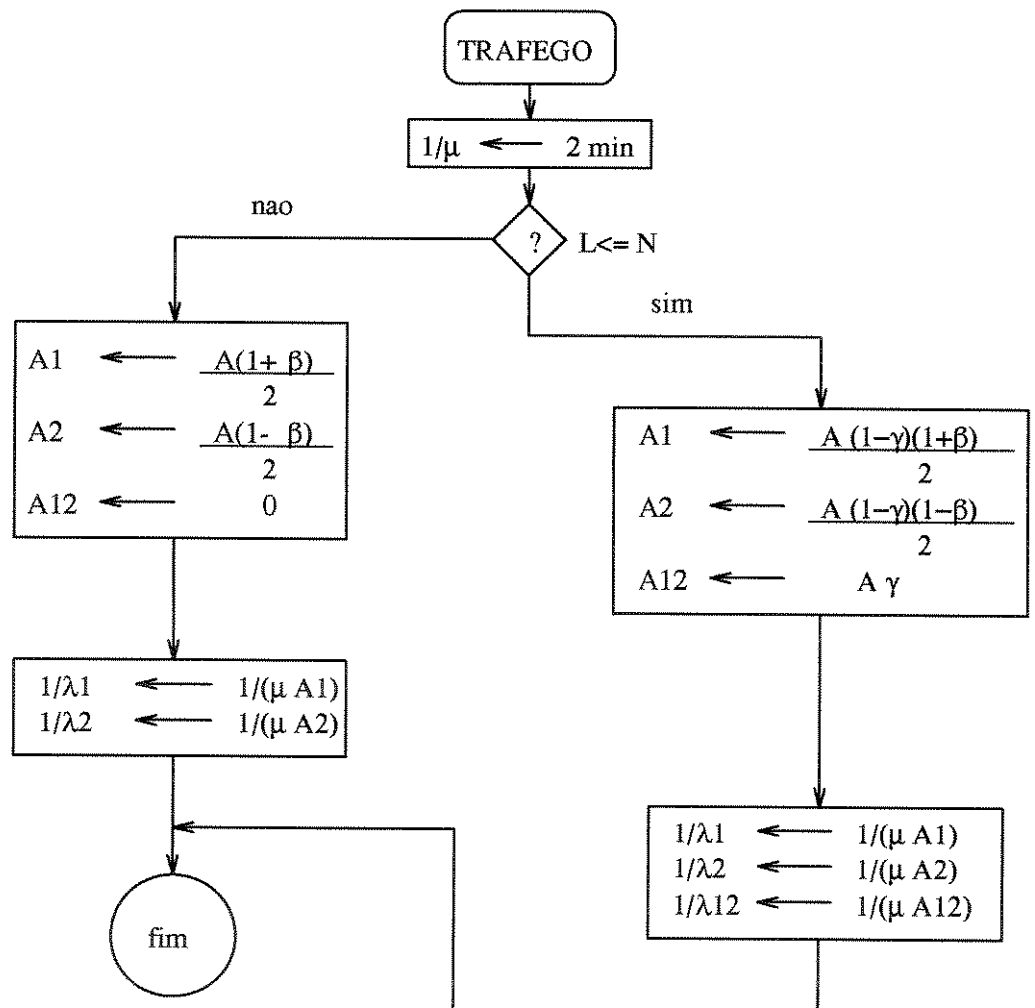


Figura C.2: Procedimento que trata do tráfego do Modelo 2

C.2.1 Descrição das Instruções

$1/\mu \leftarrow 2 \text{ min}$: Indica que a duração média das chamadas será de 2 minutos.

$L \leq N$: Comando de decisão que indica se a técnica da *variação do limiar de bloqueio* será usada ou não.

$A1 \leftarrow \frac{A(1-\gamma)(1+\beta)}{2}$: Indica o tráfego fixo da célula 1.

$A2 \leftarrow \frac{A(1-\gamma)(1-\beta)}{2}$: Indica o tráfego fixo da célula 2.

$A1 \leftarrow \frac{A(1+\beta)}{2}$: Indica o tráfego da célula 1. Note que somente o balanceamento é considerado quando a técnica não é utilizada, ou seja, o sistema considera que todo o tráfego da célula está concentrado na região fixa.

$A2 \leftarrow \frac{A(1-\beta)}{2}$: Indica o tráfego da célula 2. Note que somente o balanceamento é considerado quando a técnica não é utilizada, ou seja, o sistema considera que todo o tráfego da célula está concentrado na região fixa.

$A12 \leftarrow A \gamma$: Indica o tráfego flexível do sistema.

$A12 \leftarrow 0$: Indica que não existe tráfego flexível no sistema.

$1/\lambda1 \leftarrow 1/(\mu A1)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego fixo da célula 1.

$1/\lambda2 \leftarrow 1/(\mu A2)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego fixo da célula 2.

$1/\lambda12 \leftarrow 1/(\mu A12)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego flexível do sistema.

C.3 Simulação

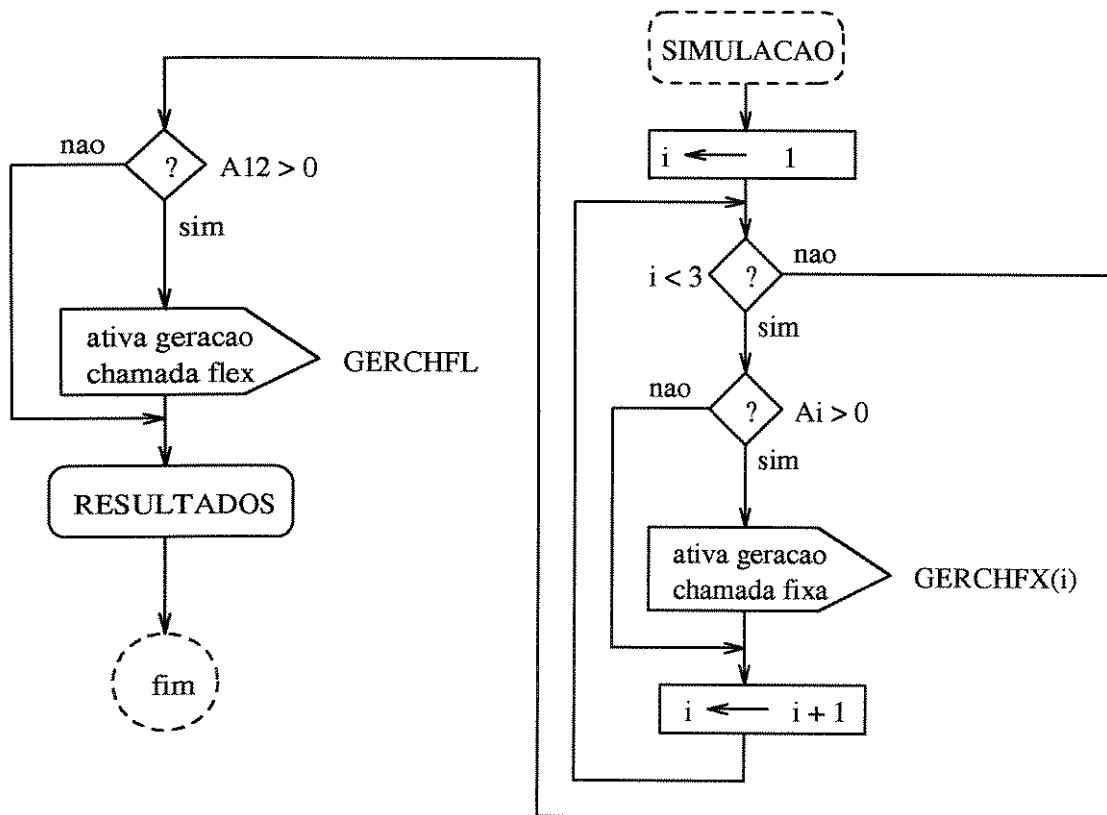


Figura C.3: Processo que trata da simulação do Modelo 2

C.3.1 Descrição das Instruções

$i \leftarrow 1$: Variável que indica a célula e que tem como valor inicial a célula 1.

$i < 3$: Comando de decisão que limita as quantidades de células no sistema em dois.

$A_i > 0$: Comando de decisão para ativar a geração de chamadas fixas através do processo $GERCHFX(i)$ somente se existir tráfego fixo na célula i .

$i \leftarrow i + 1$: Indica a próxima célula do sistema.

A12 > 0: Comando de decisão para ativar a geração de chamadas flexíveis do sistema através do processo *GERCHF* somente se existir tráfego flexível no sistema.

RESULTADOS: É o procedimento que fornece os resultados da simulação. Este procedimento é executado somente quando a simulação termina.

C.4 Geração de Chamadas Fixa

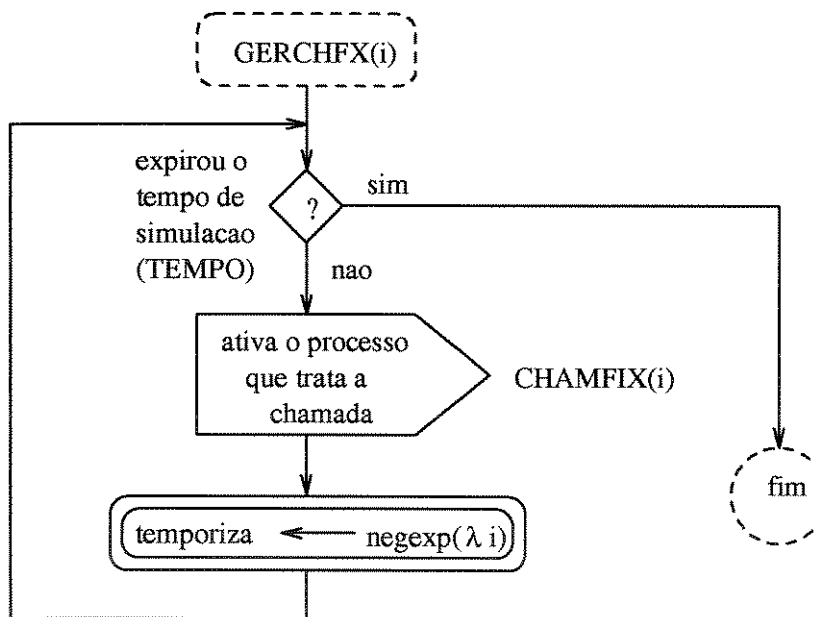


Figura C.4: Processo que trata da geração de chamadas da parte fixa do Modelo 2

C.4.1 Descrição das intruções

expirou tempo de simulacao (TEMPO): Indica que enquanto não expirar o tempo de simulação o processo *GERCHF(i)* gera uma nova chamada na região fixa da célula *i*, simbolizada pela ativação do processo *CHAMFIX(i)*.

ativa o processo que trata a chamada (CHAMFIX(i)): Ativa o processo que trata de uma nova chamada na região fixa da célula i . O programa ativa a chamada e retorna para a instrução seguinte, ou seja, o processo $GERCHFX(i)$ não espera o processo $CHAMFIX(i)$ terminar para executar a próxima instrução.

temporiza $\leftarrow$ negexp(λi): Indica que o tempo entre chamadas na região fixa da célula i é dado por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\lambda i$.

C.5 Geração de Chamadas Flexível

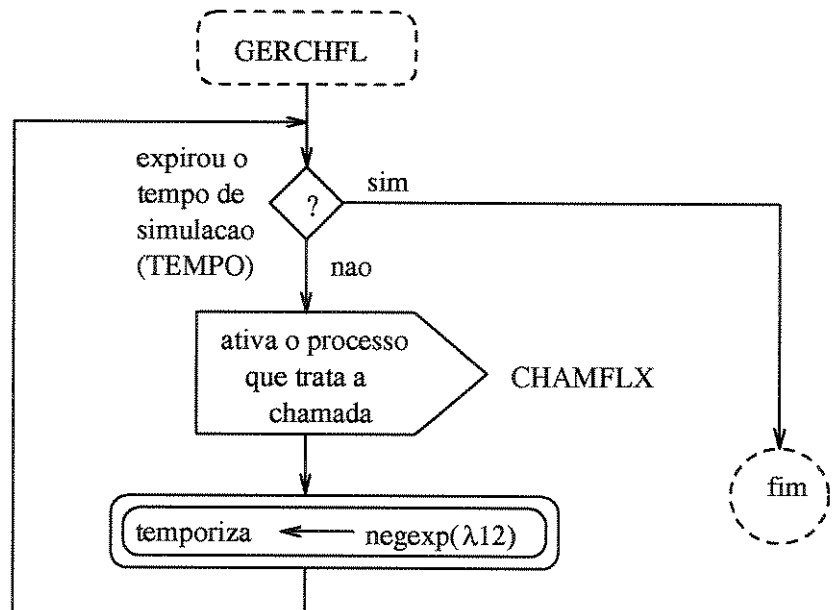


Figura C.5: Processo que trata da geração de chamadas da parte flexível do Modelo 2

C.5.1 Descrição das instruções

expirou tempo de simulacao (TEMPO): Indica que enquanto não expirar o tempo de simulação o processo *GERCHFL* gera uma nova chamada na região flexível do sistema, simbolizada pela ativação do processo *CHAMFLX*.

ativa o processo que trata a chamada (CHAMFLX): Ativa o processo que trata de uma nova chamada na região flexível do sistema. O programa ativa a chamada e retorna para a instrução seguinte, ou seja, o processo *GERCHFL* não espera o processo *CHAMFLX* terminar para executar a próxima instrução.

temporiza $\leftarrow$ negexp(λ_{12}): Indica que o tempo entre chamadas na região flexível do sistema é dado por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\lambda_{12}$.

C.6 Chamada Fixa

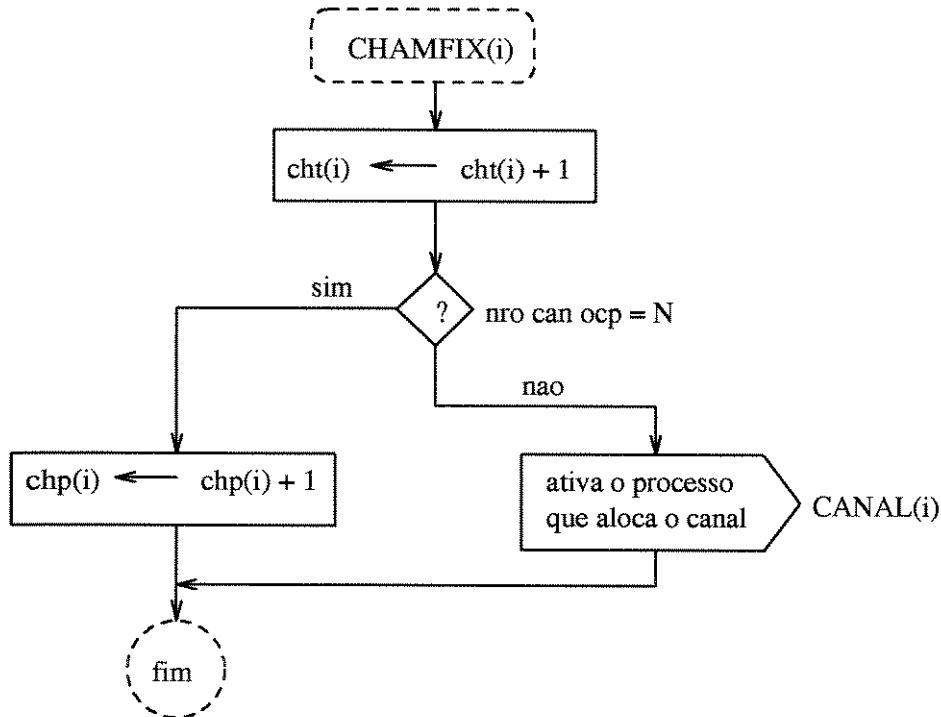


Figura C.6: Processo que trata a chamada da parte fixa do Modelo 2

C.6.1 Descrição das Instruções

$\text{cht}(i) \leftarrow \text{cht}(i) + 1$: Calcula o número totais de chamadas fixas da célula i .

$\text{nro can ocp} = N$: Este comando de decisão verifica se o número de canais ocupados da célula i atingiu o limite (N). Caso tenha atingido o limite a chamada é perdida, senão é alocado um canal para a chamada.

$\text{chp}(i) \leftarrow \text{chp}(i) + 1$: Calcula o número totais de chamadas fixas perdidas da célula i .

ativa o processo que aloca o canal (CANAL(i)): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região fixa da célula i . Observe que este

processo só é ativado quando o número de canais ocupados da célula i não atingir o limite (N).

C.7 Chamada Flexível

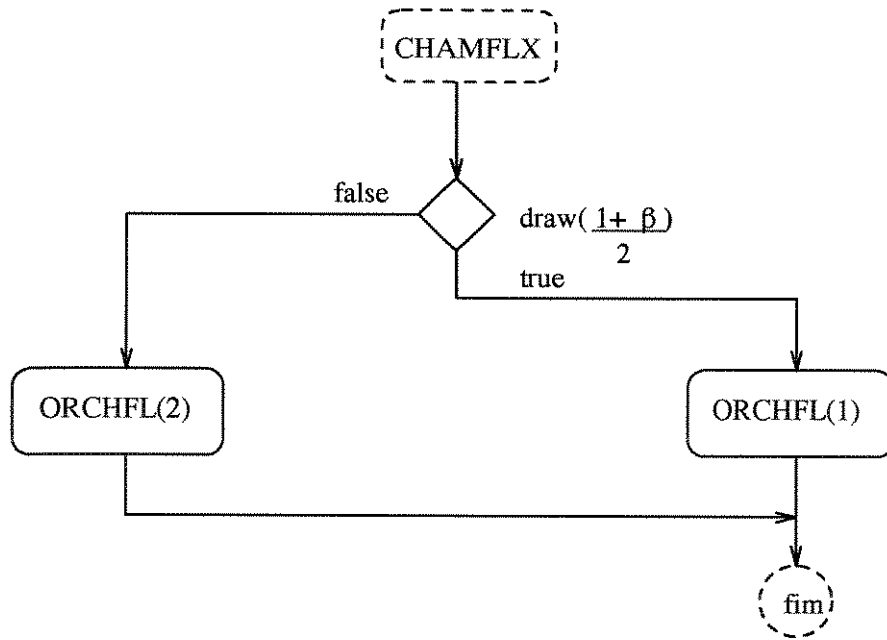


Figura C.7: Processo que trata a chamada da parte flexível do Modelo 2

C.7.1 Descrição das Instruções

draw ($\frac{1+\beta}{2}$): Função aleatória que fornece *true* durante $A1/(A1 + A2) = (1 + \beta)/2$ do tempo de simulação. Observe que esta função simula a proporção de chamadas flexíveis que são geradas na célula 1.

ORCHFL(1): Procedimento que trata a chamada originada na região flexível da célula 1.

ORCHFL(2): Procedimento que trata a chamada originada na região flexível da célula 2.

C.8 Origem da Chamada Flexível

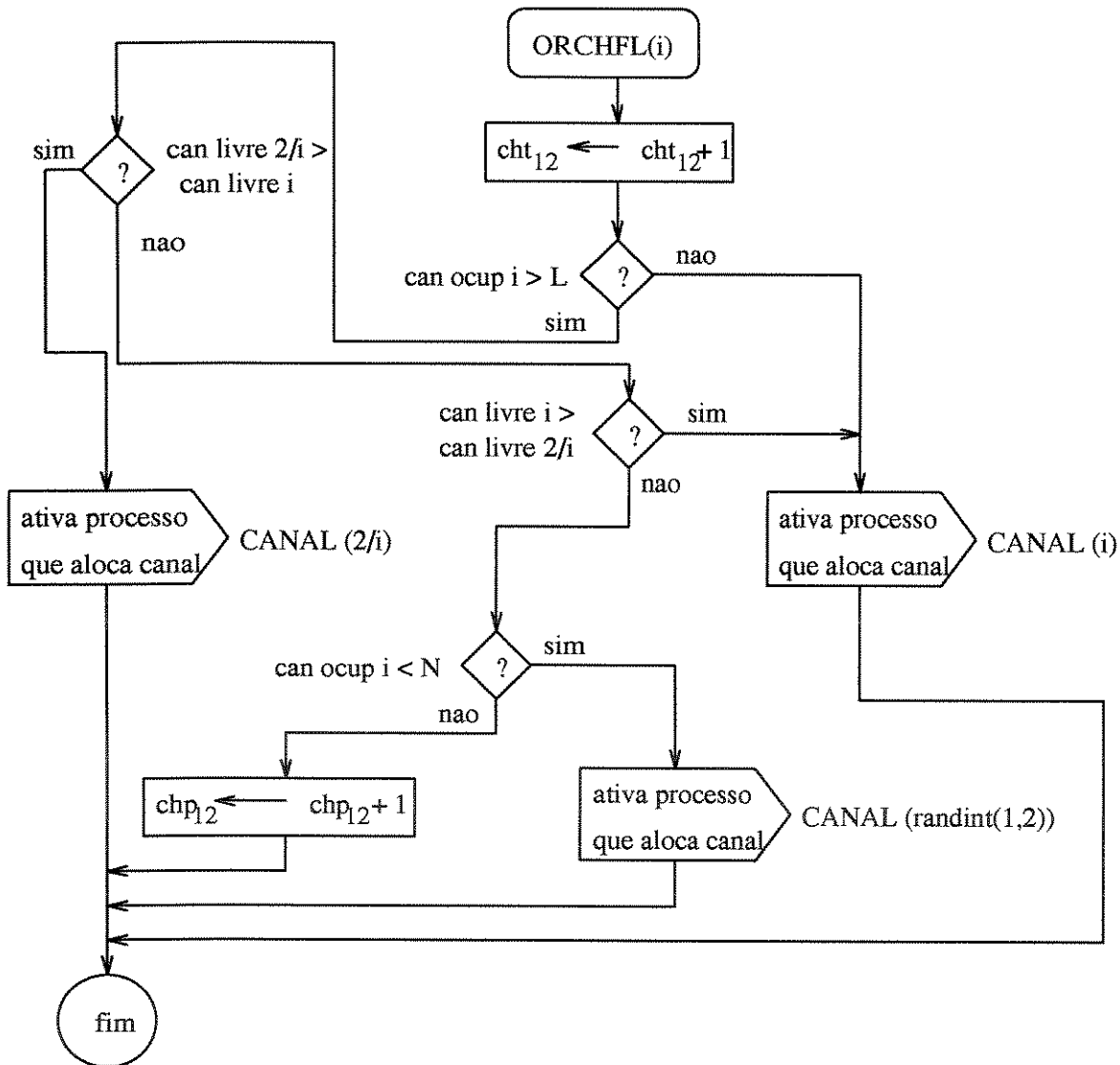


Figura C.8: Procedimento que trata a chamada originada na região flexível de uma das células do Modelo 2

C.8.1 Descrição das Instruções

cht₁₂ ← cht₁₂ + 1: Calcula o número totais de chamadas flexíveis.

can ocup i ≥ L: Comando de decisão que verifica se o número de canais ocupados da célula *i* é maior ou igual ao valor de limiar *L*. Observe que quando o número de canais ocupados for menor do que *L* a *variação do limiar de bloqueio* não é usada.

ativa processo que aloca canal (CANAL(*i*)): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região flexível da célula *i*.

can livre 2/*i* > can livre *i*: Comando de decisão que verifica se o número de canais livres da célula 2/*i* (*i*= 1 ou 2) é maior do que o da célula *i*.

ativa processo que aloca canal (CANAL(2/*i*)): Este processo trata da alocação do canal da célula 2/*i* (*i*= 1 ou 2) para a chamada originada na região flexível da célula *i*. Note que a alocação do canal está sendo realizada na célula diferente daquela onde foi originada a chamada.

can livre *i* > can livre 2/*i*: Comando de decisão que verifica se o número de canais livres da célula *i* (*i*= 1 ou 2) é maior do que o da célula 2/*i*.

can ocup *i* < N: Comando de decisão que verifica se o número de canais ocupados da célula *i* é menor do que o número totais de canais (*N*). Na realidade este comando de decisão verifica se as duas células estão com todos os seus *N* canais ocupados, neste caso o número de canais livres da célula *i* também seria igual ao número de canais livres da célula 2/*i*, ou seja, 0 canais livres.

ativa processo que aloca canal (CANAL(randint(1,2))): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região flexível da célula *i*, onde *randint(1,2)* é uma função que tem uma distribuição uniforme entre os inteiros 1 e 2. Isto indica que a alocação do canal pode ocorrer tanto na célula 1 ou 2 com a mesma probabilidade.

chp₁₂ ← chp₁₂ + 1: Calcula o número totais de chamadas flexíveis perdidas.

C.9 Canal

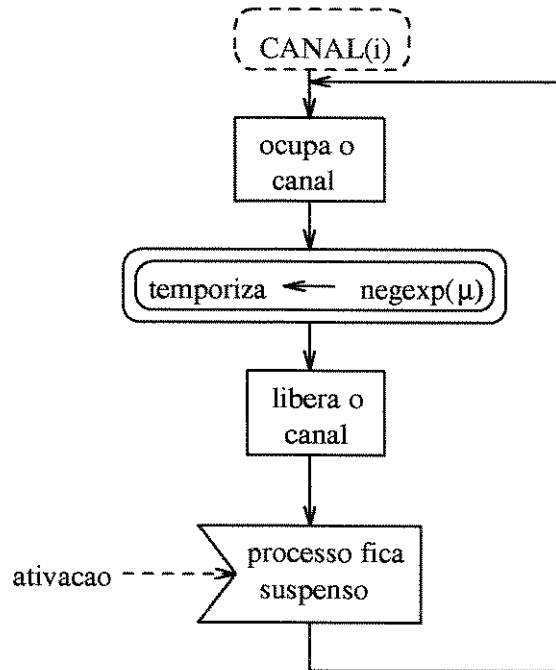


Figura C.9: Processo que trata do canal do Modelo 2

C.9.1 Descrição das Instruções

ocupa o canal: Indica que o processo que cuida deste canal, dentre os N da célula i , está ocupado.

temporiza ← negexp(μ): Indica que a duração da chamada ou ocupação do canal é dada por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\mu$.

libera o canal: Indica que o canal está livre, ou seja, pode ser alocada para uma nova chamada.

processo fica suspenso: Indica que o processo fica suspenso (inativo) até que ele seja ativado por uma nova chamada (processo $CHAMFIX(i)$ ou $CHAMFLX$). Note que o processo $CANAL(i)$ só termina quando a simulação encerra a execução. Além disso como há N canais teremos também N processos $CANAL(i)$ para cada célula i .

C.10 Resultados

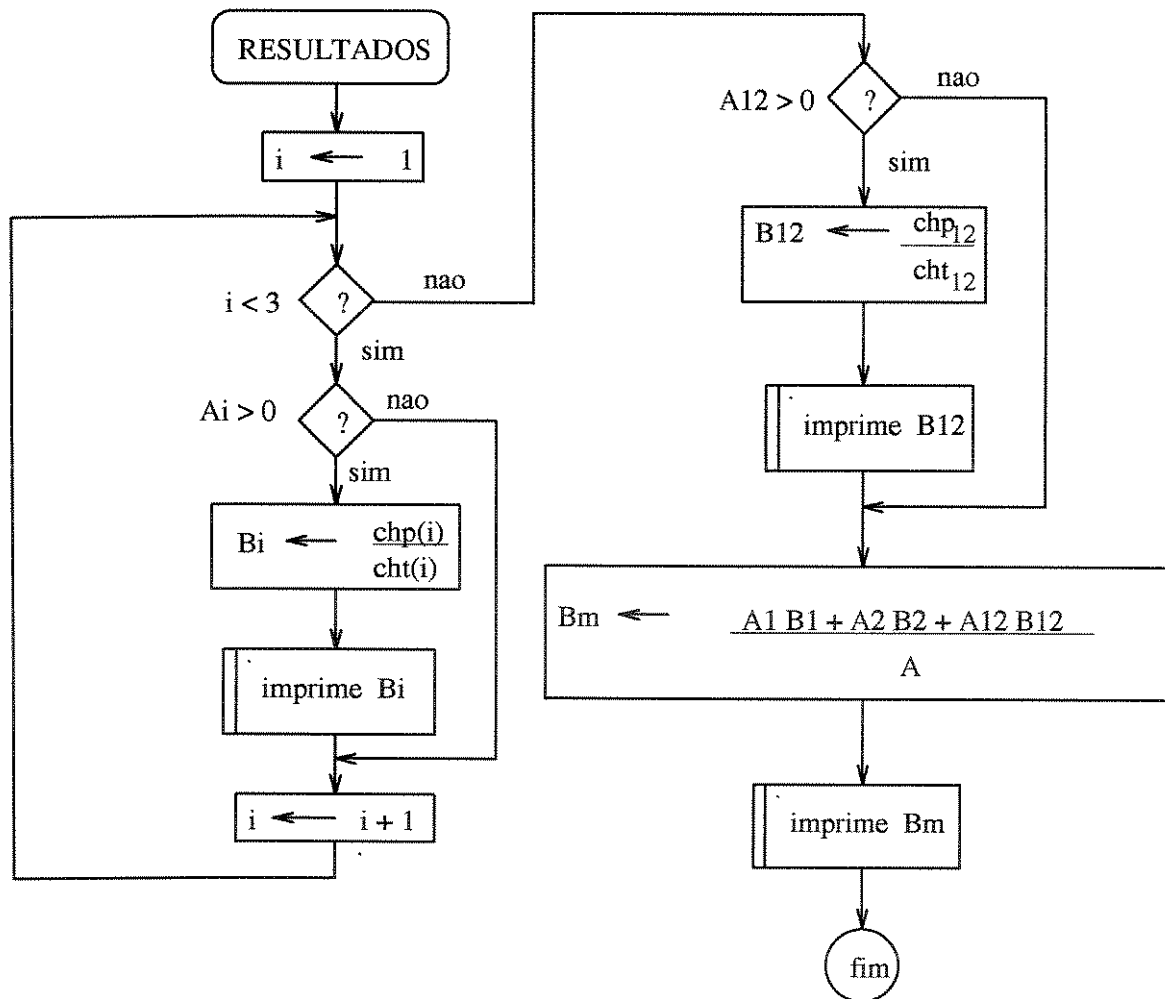


Figura C.10: Procedimento que trata dos resultados do Modelo 2

C.10.1 Descrição das Instruções

$i \leftarrow 1$: Variável que indica a célula e que tem como valor inicial a célula 1.

$i < 3$: Comando de decisão que limita as quantidades de células no sistema em dois.

$A_i > 0$: Comando de decisão que verifica se existe o tráfego fixo da célula i .

$B_i \leftarrow \frac{chp(i)}{cht(i)}$: Calcula o bloqueio da região fixa da célula i .

imprime B_i : Imprime o resultado do bloqueio da região fixa da célula i .

$i \leftarrow i + 1$: Indica a próxima célula do sistema.

$A_{12} > 0$: Comando de decisão que verifica se existe tráfego flexível no sistema.

$B_{12} \leftarrow \frac{chp_{12}}{cht_{12}}$: Calcula o bloqueio flexível do sistema.

imprime B_{12} : Imprime o resultado do bloqueio da região flexível do sistema.

$B_m \leftarrow \frac{A_1B_1+A_2B_2+A_{12}B_{12}}{A}$: Calcula o bloqueio médio do sistema.

imprime B_m : Imprime o resultado do bloqueio médio do sistema.

Apêndice D

Fluxograma do Modelo 3

D.1 Programa Principal

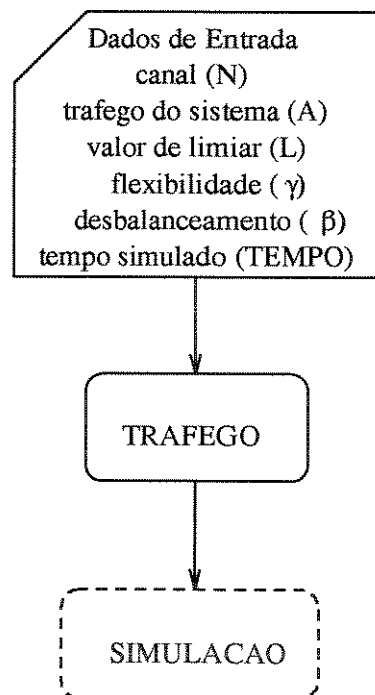


Figura D.1: Programa principal do Modelo 3

D.1.1 Descrição dos Blocos

Dados de Entrada: Este bloco implementa a interação com o usuário, onde são fornecidos os parâmetros de entrada.

TRAFEGO: Este bloco implementa os fenômenos relacionados ao tráfego.

SIMULACAO: Neste bloco estão todos os processos relacionados a simulação.

D.2 Tráfego

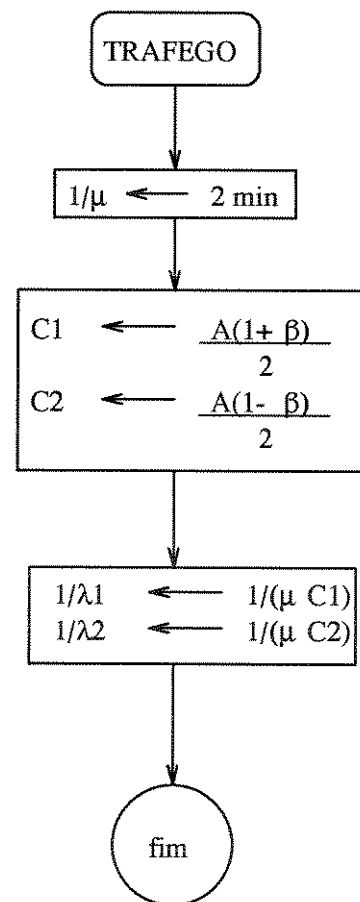


Figura D.2: Procedimento que trata do tráfego do Modelo 3

D.2.1 Descrição das Instruções

$1/\mu \leftarrow 2 \text{ min}$: Indica que a duração média das chamadas será de 2 minutos.

$C1 \leftarrow \frac{A(1+\beta)}{2}$: Calcula o tráfego total da célula 1.

$C2 \leftarrow \frac{A(1-\beta)}{2}$: Calcula o tráfego total da célula 2.

$1/\lambda_1 \leftarrow 1/(\mu \ C1)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego total da célula 1.

$1/\lambda_2 \leftarrow 1/(\mu \ C2)$: Indica o tempo entre chamadas do tráfego total da célula 2.

D.3 Simulação

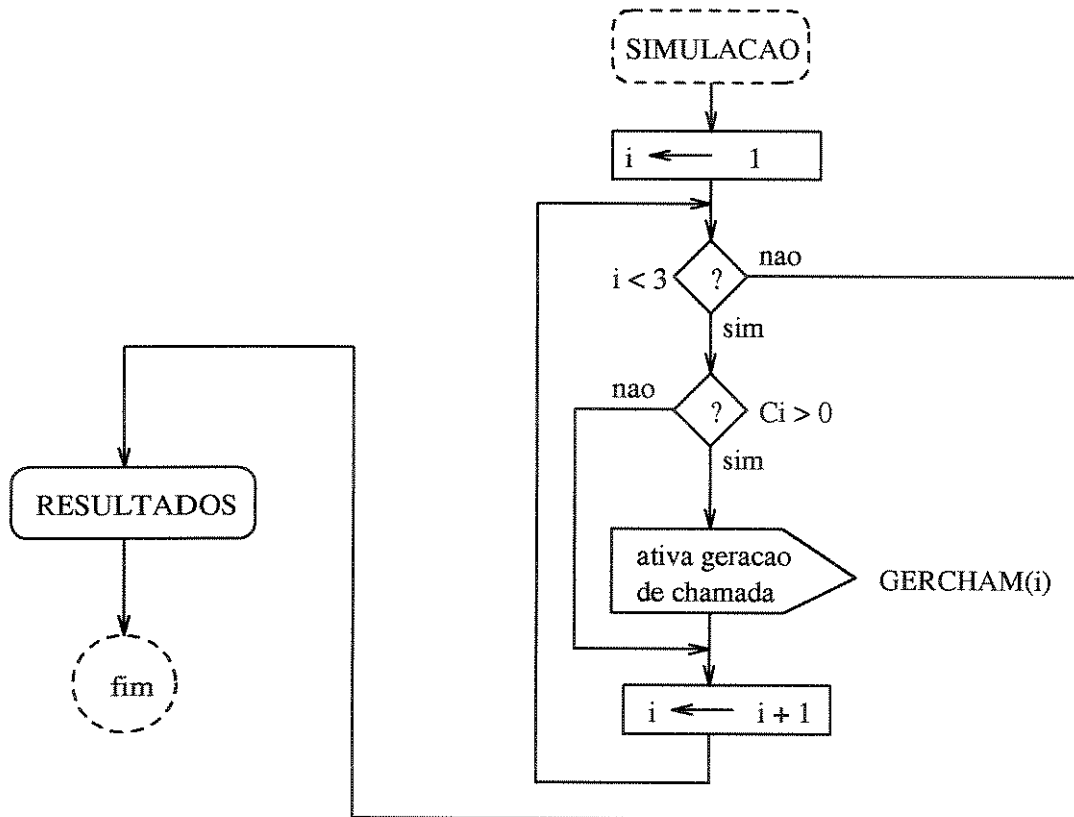


Figura D.3: Processo que trata da simulação do Modelo 3

D.3.1 Descrição das Instruções

$i \leftarrow 1$: Variável que indica a célula e que tem como valor inicial a célula 1.

$i < 3$: Comando de decisão que limita as quantidades de células no sistema em dois.

$C_i > 0$: Comando de decisão para ativar a geração de chamadas fixas ou flexíveis através do processo $GERCHAM(i)$ somente se existir tráfego na célula i .

$i \leftarrow i + 1$: Indica a próxima célula do sistema.

RESULTADOS: É o procedimento que fornece os resultados da simulação. Este procedimento é executado somente quando a simulação termina.

D.4 Geração de Chamadas

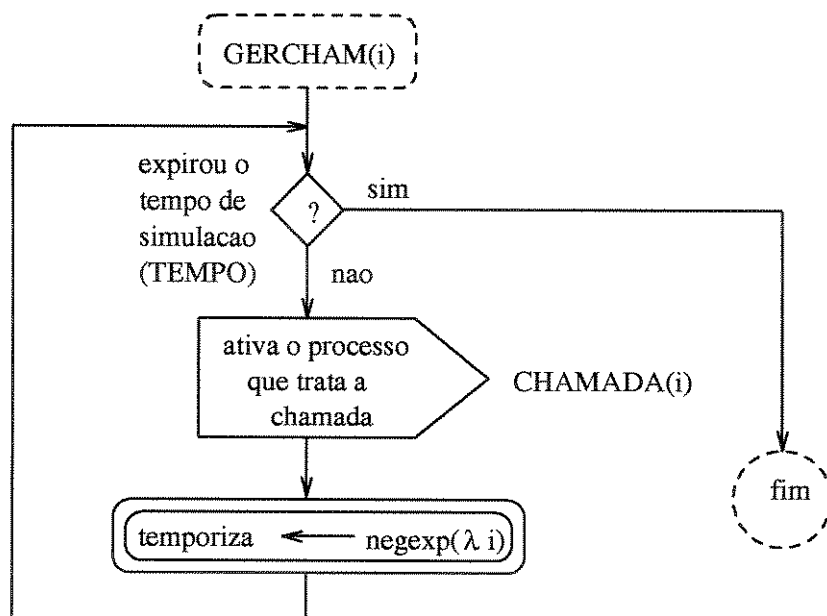


Figura D.4: Processo que trata da geração de chamadas do Modelo 3

D.4.1 Descrição das instruções

expirou tempo de simulacao (TEMPO): Indica que enquanto não expirar o tempo de simulação o processo $GERCHAM(i)$ gera uma nova chamada na célula i , simbolizada pela ativação do processo $CHAMADA(i)$.

ativa o processo que trata a chamada (CHAMADA(i)): Ativa o processo que trata de uma nova chamada na célula i . O programa ativa a chamada e retorna para a instrução seguinte, ou seja, o processo $GERCHAM(i)$ não espera o processo $CHAMADA(i)$ terminar para executar a próxima instrução.

temporiza $\leftarrow \text{negexp}(\lambda i)$: Indica que o tempo entre chamadas da célula i é dado por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\lambda i$.

D.5 Chamada

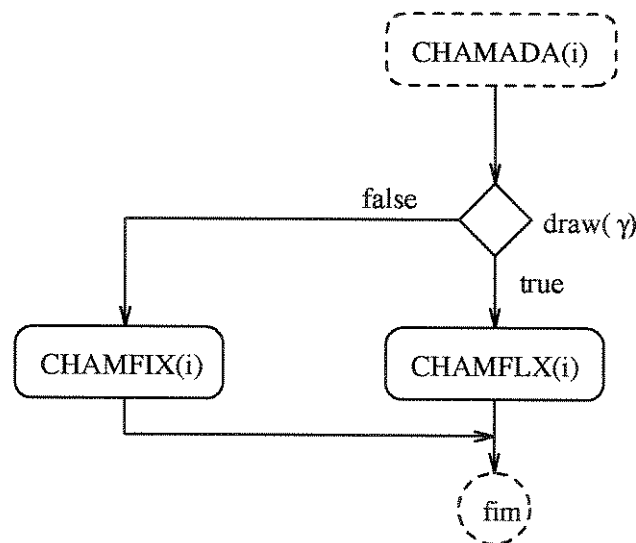


Figura D.5: Processo que trata a chamada do Modelo 3

D.5.1 Descrição das Instruções

draw (γ): Função aleatória que fornece *true* durante γ % do tempo de simulação. Observe que esta função simula a proporção de chamadas que são flexíveis na célula i .

CHAMFLX(i): Procedimento que trata das chamadas flexíveis da célula i .

CHAMFIX(i): Procedimento que trata das chamadas fixas da célula i .

D.6 Chamada Fixa

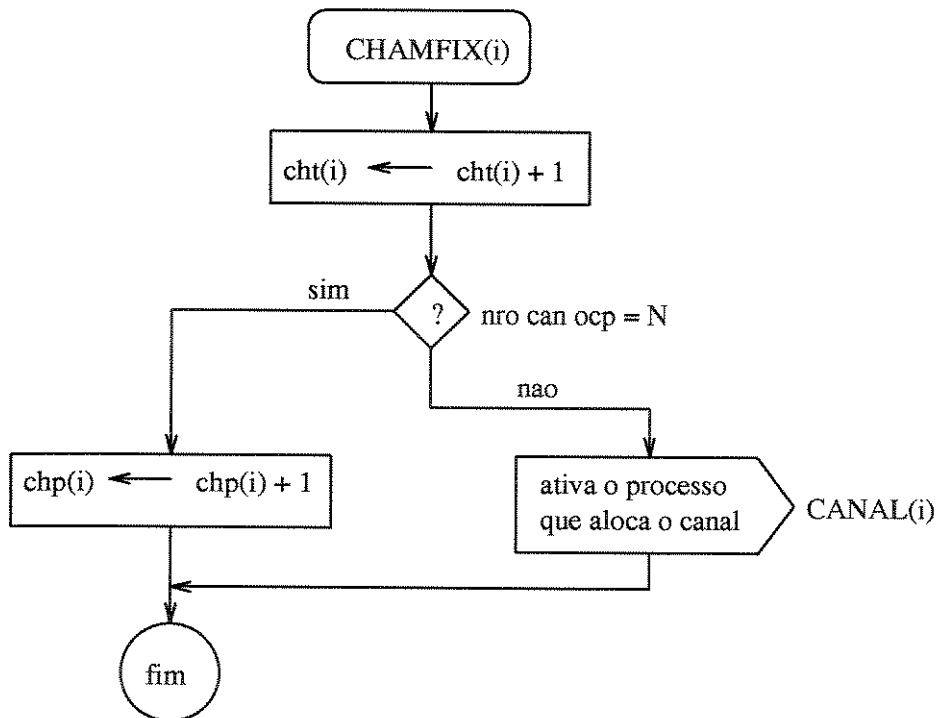


Figura D.6: Procedimento que trata a chamada da parte fixa do Modelo 3

D.6.1 Descrição das Instruções

cht(i) $\leftarrow$ cht(i) + 1: Calcula o número totais de chamadas fixas da célula i .

nro can ocp = N: Este comando de decisão verifica se o número de canais ocupados da célula i atingiu o limite (N). Caso tenha atingido o limite a chamada é perdida, senão é alocado um canal para a chamada.

chp(i) $\leftarrow$ chp(i) + 1: Calcula o número totais de chamadas fixas perdidas da célula i .

ativa o processo que aloca o canal (CANAL(i)): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região fixa da célula i . Observe que este processo só é ativado quando o número de canais ocupados da célula i não atingir o limite (N).

D.7 Chamada Flexível

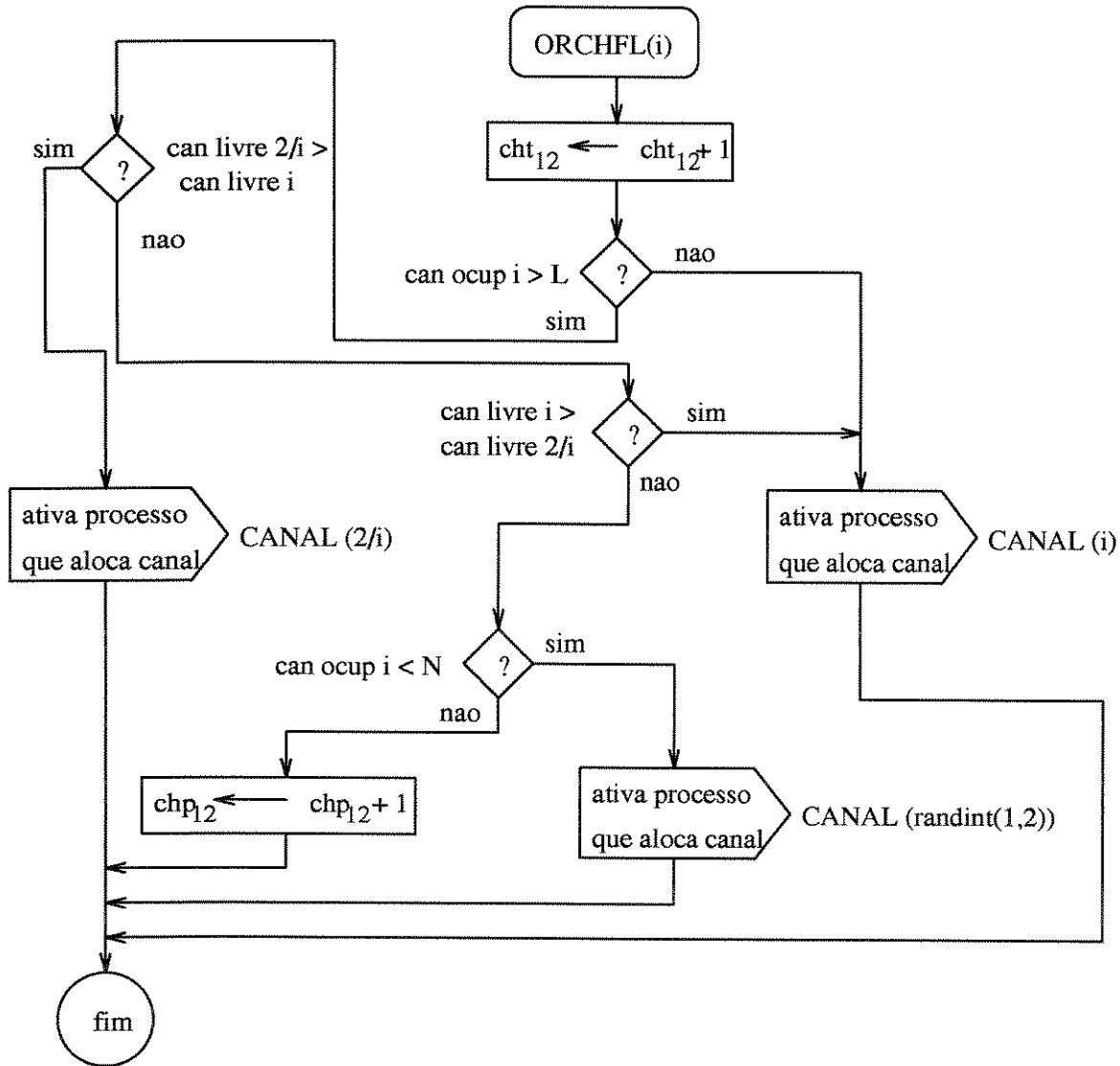


Figura D.7: Procedimento que trata a chamada da parte flexível do Modelo 3

D.7.1 Descrição das Instruções

$cht_{12} \leftarrow cht_{12} + 1$: Calcula o número totais de chamadas flexíveis.

can ocup $i \geq L$: Comando de decisão que verifica se o número de canais ocupados da célula i é maior ou igual ao valor de limiar L . Observe que quando o número de canais ocupados for menor do que L a *variação do limiar de bloqueio* não é usada.

ativa processo que aloca canal (CANAL(i)): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região flexível da célula i .

can livre $2/i > \text{can livre } i$: Comando de decisão que verifica se o número de canais livres da célula $2/i$ ($i=1$ ou 2) é maior do que o da célula i .

ativa processo que aloca canal (CANAL($2/i$)): Este processo trata da alocação do canal da célula $2/i$ ($i=1$ ou 2) para a chamada originada na região flexível da célula i . Note que a alocação do canal está sendo realizada na célula diferente daquela onde foi originada a chamada.

can livre $i > \text{can livre } 2/i$: Comando de decisão que verifica se o número de canais livres da célula i ($i=1$ ou 2) é maior do que o da célula $2/i$.

can ocup $i < N$: Comando de decisão que verifica se o número de canais ocupados da célula i é menor do que o número totais de canais (N). Na realidade este comando de decisão verifica se as duas células estão com todos os seus N canais ocupados, neste caso o número de canais livres da célula i também seria igual ao número de canais livres da célula $2/i$, ou seja, 0 canais livres.

ativa processo que aloca canal (CANAL(randint(1,2))): Este processo trata da alocação do canal para a chamada originada na região flexível da célula i , onde $\text{randint}(1,2)$ é uma função que tem uma distribuição uniforme entre os inteiros 1 e 2 . Isto indica que a alocação do canal pode ocorrer tanto na célula 1 ou 2 com a mesma probabilidade.

chp₁₂ $\leftarrow$ chp₁₂ + 1: Calcula o número totais de chamadas flexíveis perdidas.

D.8 Canal

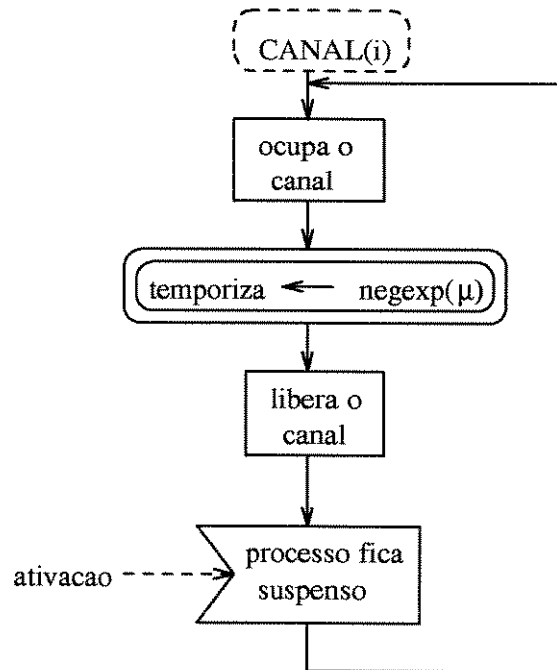


Figura D.8: Processo que trata do canal do Modelo 3

D.8.1 Descrição das Instruções

ocupa o canal: Indica que o processo que cuida deste canal, dentre os N da célula i , está ocupado.

temporiza ← negexp(μ): Indica que a duração da chamada ou ocupação do canal é dada por uma função aleatória de distribuição exponencial negativa de valor médio $1/\mu$.

libera o canal: Indica que o canal está livre, ou seja, pode ser alocada para uma nova chamada.

processo fica suspenso: Indica que o processo fica suspenso (inativo) até que ele seja ativado por uma nova chamada (processo *CHAMADA(i)*). Note que o processo *CANAL(i)* só termina quando a simulação encerra a execução. Além disso como há N canais teremos também N processos *CANAL(i)* para cada célula i .

D.9 Resultados

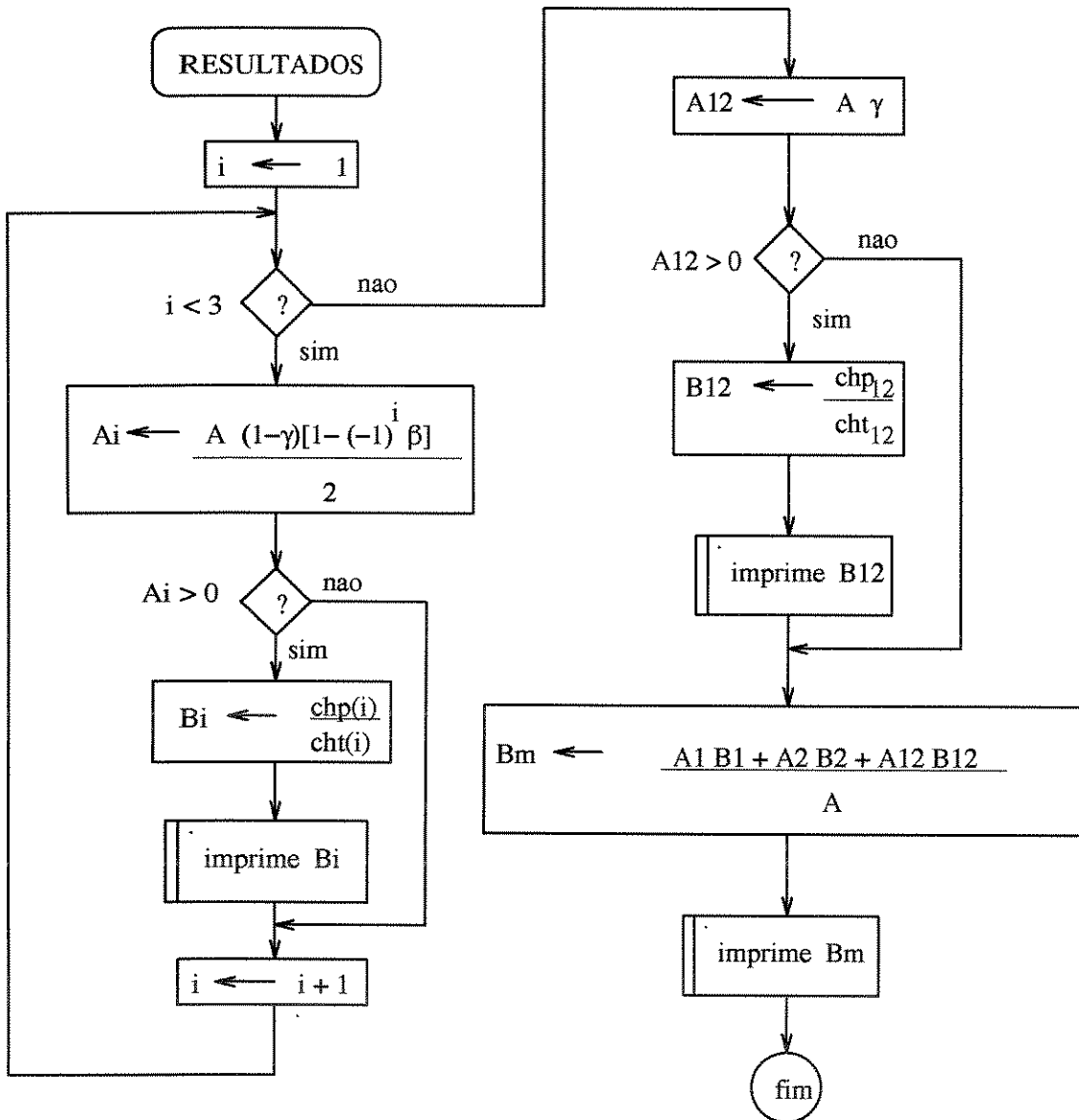


Figura D.9: Procedimento que trata dos resultados do Modelo 3

D.9.1 Descrição das Instruções

$i \leftarrow 1$: Variável que indica a célula e que tem como valor inicial a célula 1.

$i < 3$: Comando de decisão que limita as quantidades de células no sistema em dois.

Ai $\leftarrow \frac{A(1-\gamma)[1-(-1)^i\beta]}{2}$: Calcula o tráfego fixo da célula i .

Ai > 0: Comando de decisão que verifica se existe o tráfego fixo da célula i .

Bi $\leftarrow \frac{chp(i)}{cht(i)}$: Calcula o bloqueio da região fixa da célula i .

imprime Bi: Imprime o resultado do bloqueio da região fixa da célula i .

i $\leftarrow i + 1$: Indica a próxima célula do sistema.

A12 $\leftarrow A \gamma$: Calcula o tráfego flexível do sistema.

A12 > 0: Comando de decisão que verifica se existe tráfego flexível no sistema.

B12 $\leftarrow \frac{chp_{12}}{cht_{12}}$: Calcula o bloqueio flexível do sistema.

imprime B12: Imprime o resultado do bloqueio da região flexível do sistema.

Bm $\leftarrow \frac{A1B1+A2B2+A12B12}{A}$: Calcula o bloqueio médio do sistema.

imprime Bm: Imprime o resultado do bloqueio médio do sistema.

Apêndice E

Fluxograma do Sistema Infinito

E.1 Programa Principal

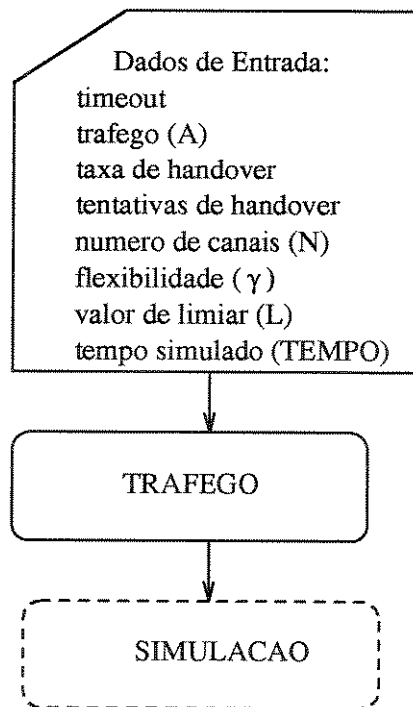


Figura E.1: Programa principal do sistema

E.2 Tráfego

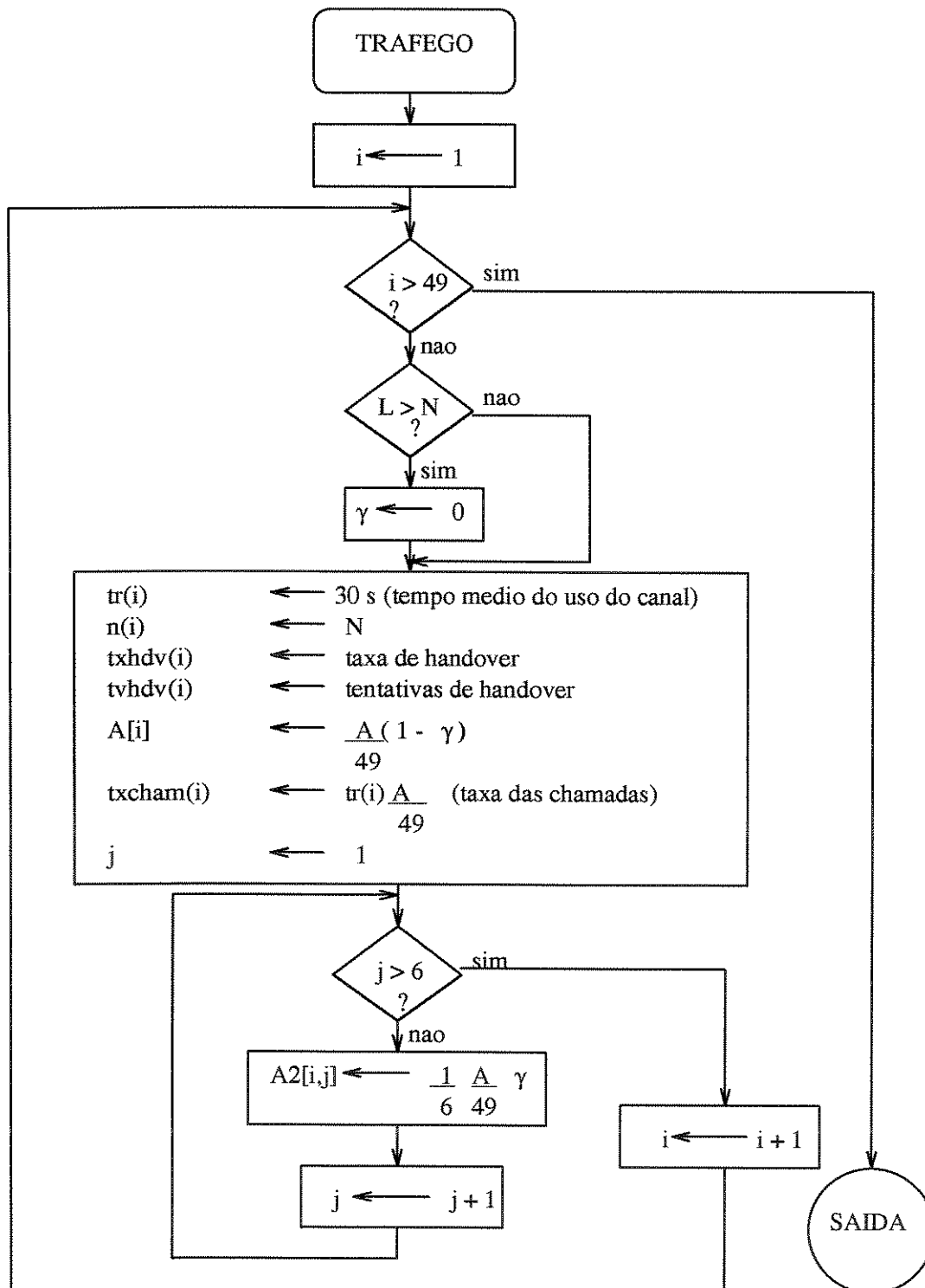


Figura E.2: Procedimento que trata do tráfego

E.3 Simulação

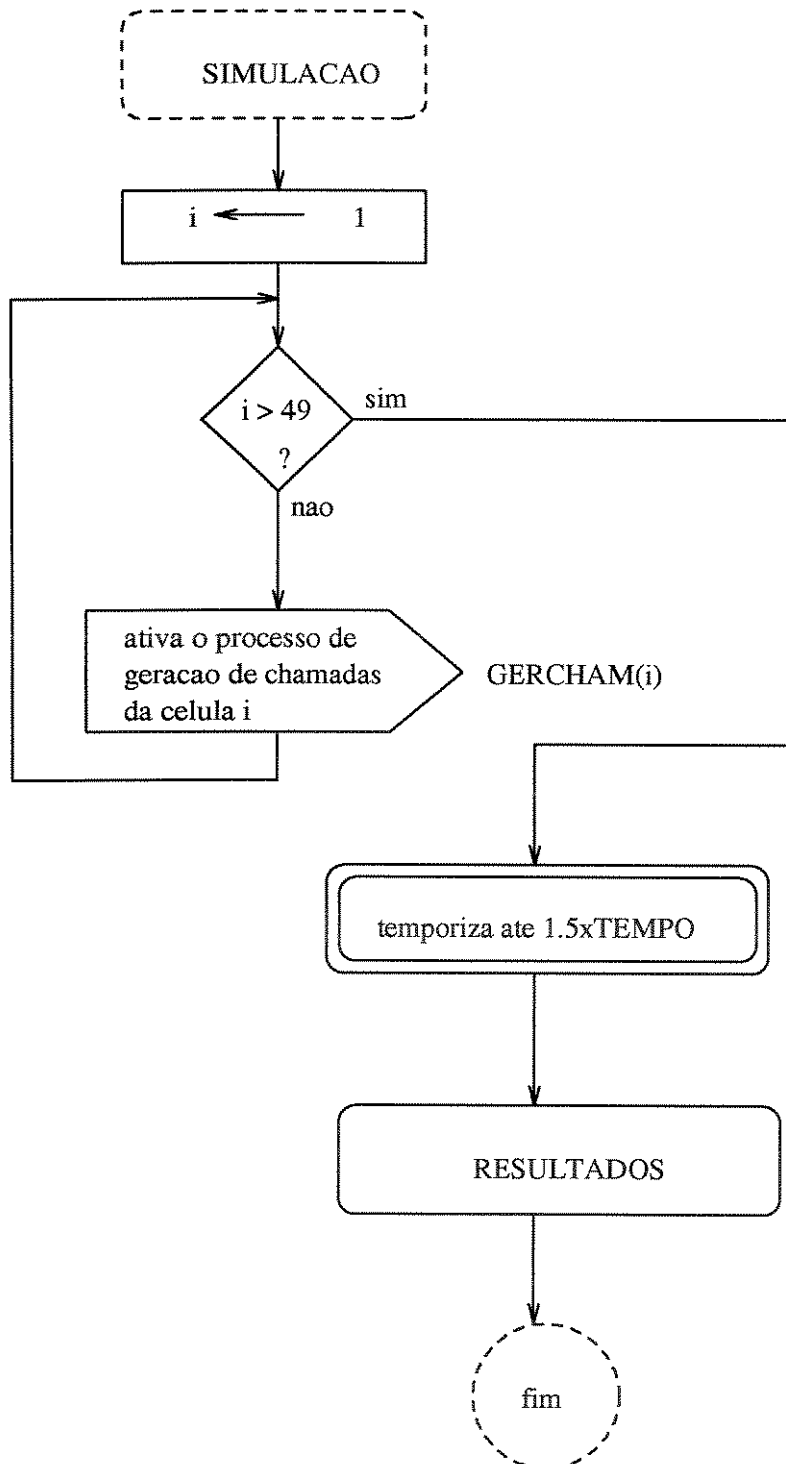


Figura E.3: Processo que trata da simulação do sistema

E.4 Geração de Chamadas

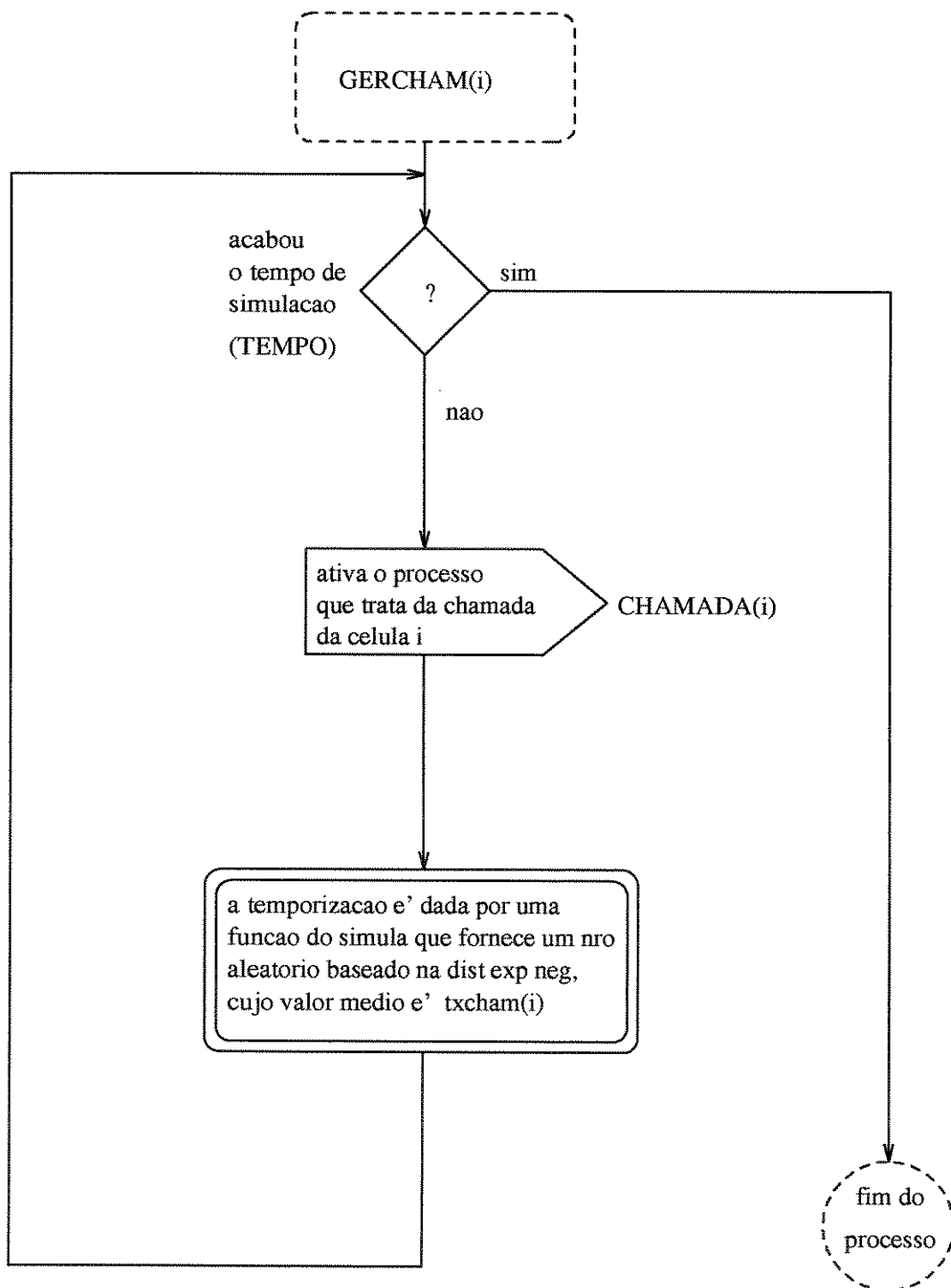


Figura E.4: Processo que trata da geração de chamadas

E.5 Chamada

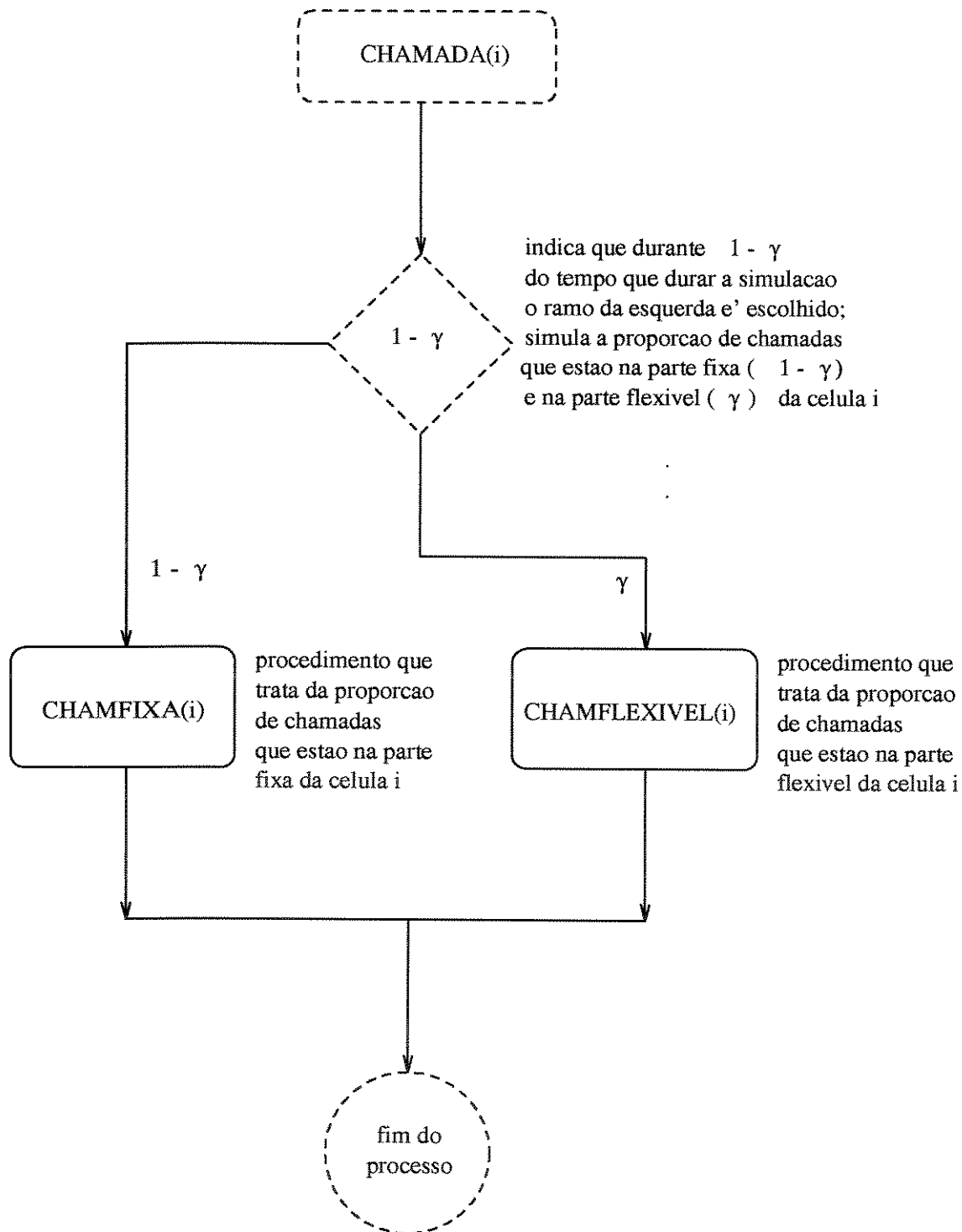


Figura E.5: Processo que trata a chamada

E.6 Chamada Fixa

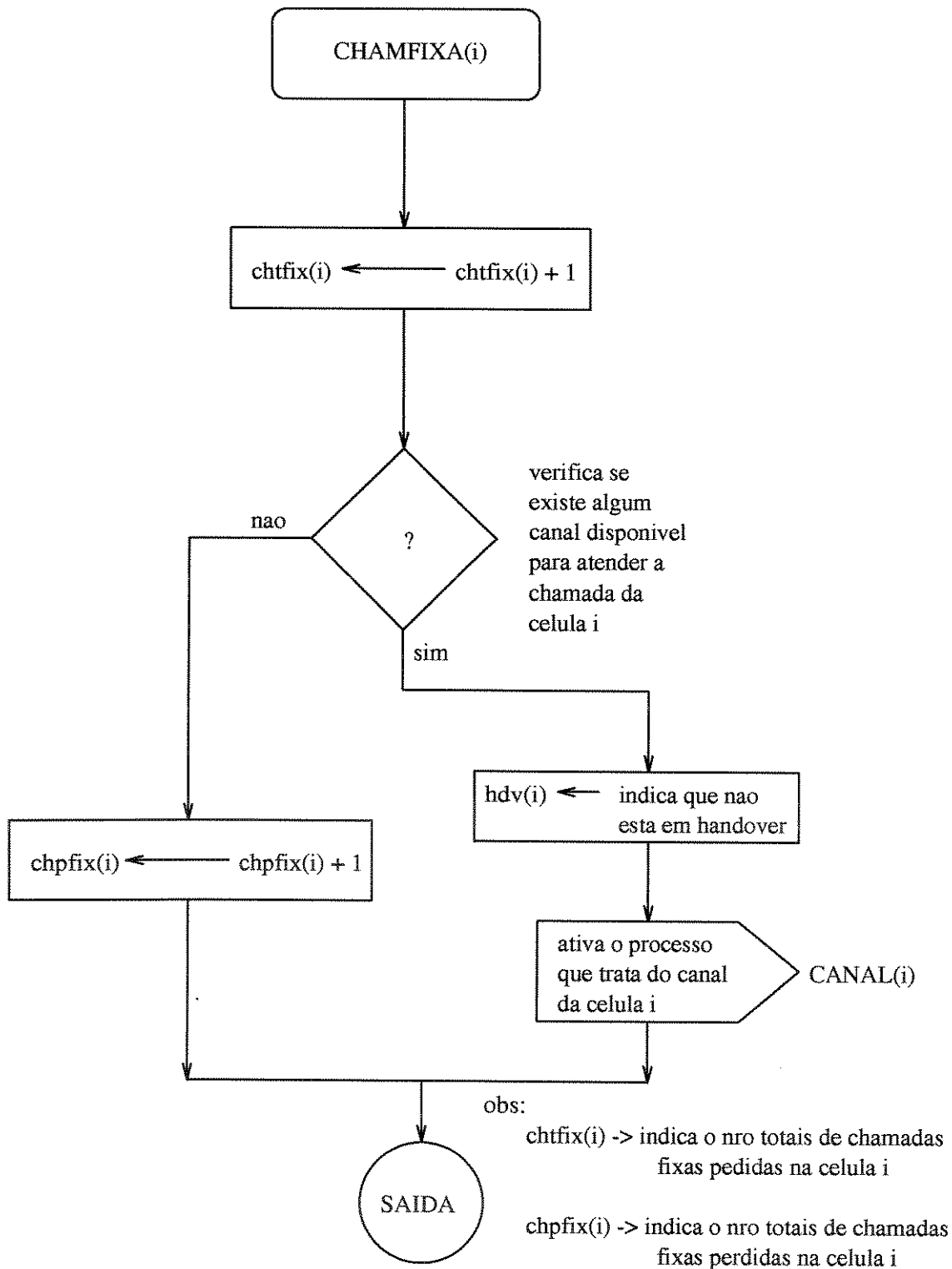


Figura E.6: Procedimento que trata da chamada fixa

E.7.1 Variáveis e Funções

randint(1,6): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório entre 1,2,...,6 com a mesma probabilidade. Esta função simula em quais das 6 regiões de intersecção (tráfego flexível) a chamada se encontra. Note que quaisquer das regiões tem a mesma probabilidade de ser escolhida.

adjacente(i,j): É uma tabela que fornece a célula adjacente de i na fronteira j .

chtflx(i,j): Variável que indica o número totais de chamadas flexíveis pedidas da célula i na região de intersecção j .

chpflx(i,j): Variável que indica o número totais de chamadas flexíveis perdidas da célula i na região de intersecção j .

E.8 Canal

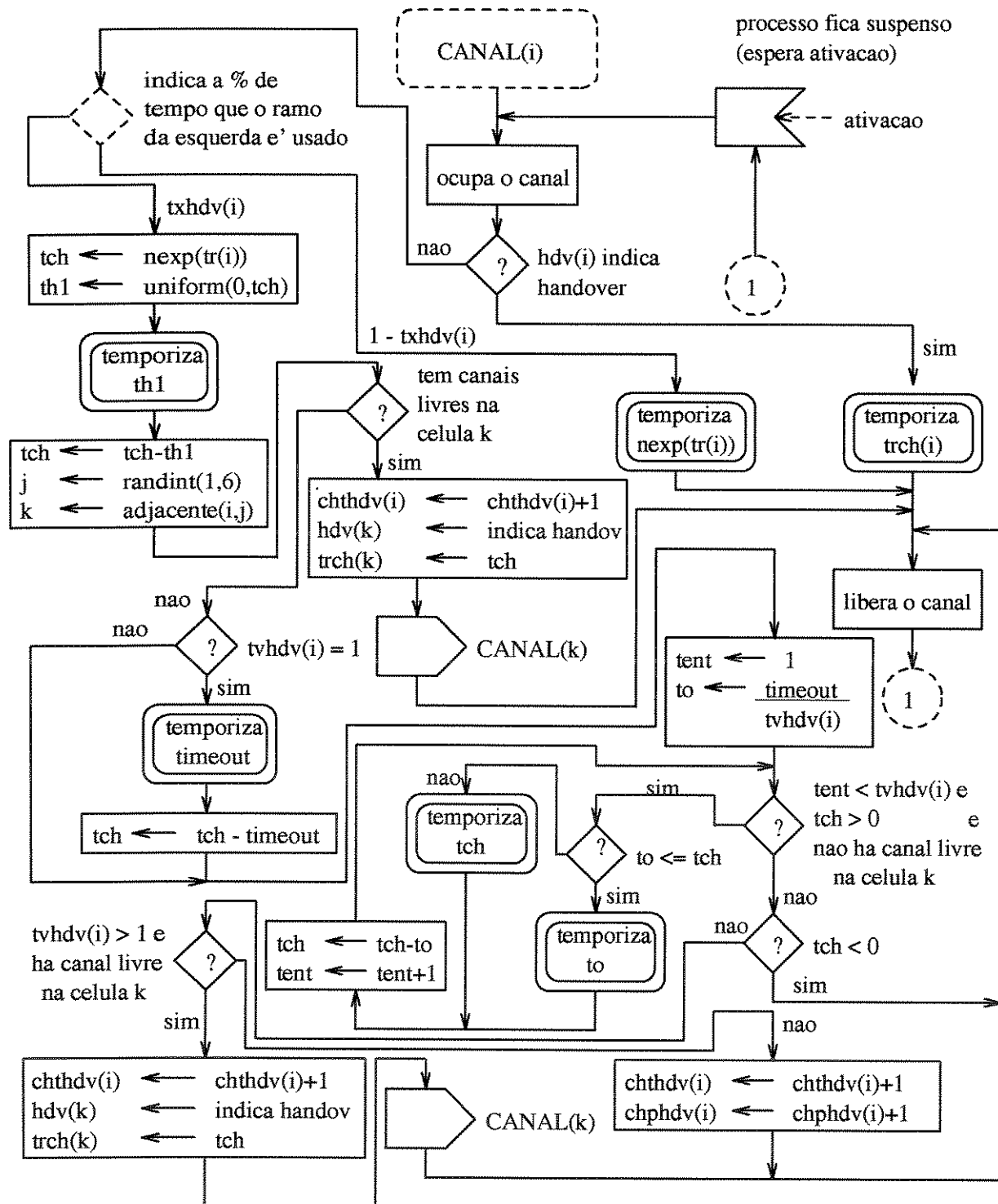


Figura E.8: Processo que trata do canal

E.8.1 Variáveis e Funções

hdv(i): Variável que indica se a chamada, que está na região fixa ou flexível da célula i , é um processo de handover.

txhdv(i): Variável que indica a proporção de chamadas originadas na célula i que fará handover.

nexp(tr(i)): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório baseado na distribuição exponencial negativa, cujo valor médio é $tr(i)$. O valor indica a duração da chamada, originada na célula i . Note que $tr(i)$ é a duração média da chamada originada na célula i .

uniform(0,tch): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório baseado na distribuição uniforme entre 0 e tch . O início ou a primeira tentativa de handover pode ocorrer em qualquer instante que durar a chamada. Isto é simulado por esta função. Note que a probabilidade de ocorrer isto é uniforme durante a duração da chamada (tch).

randint(1,6): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório entre 1,2,...,6 com a mesma probabilidade. Esta função simula em quais das 6 fronteiras a chamada originada na célula i fará o handover. Note que quaisquer das fronteiras tem a mesma probabilidade de ser escolhida.

adjacente(i,j): É uma tabela que fornece a célula adjacente de i na fronteira j .

chthdv(i): Variável que indica o número totais de handover pedidos da célula i .

trch(k): Variável que indica o tempo que resta da chamada originada na célula i , que terminará na célula k em virtude do handover.

tvhdv(i): Variável que indica o número de tentativas permitidas para a célula i .

to: Variável que indica o intervalo de tempo entre tentativas de handover.

chphdv(i): Variável que indica o número totais de handover perdidos da célula i .

E.9 Resultados

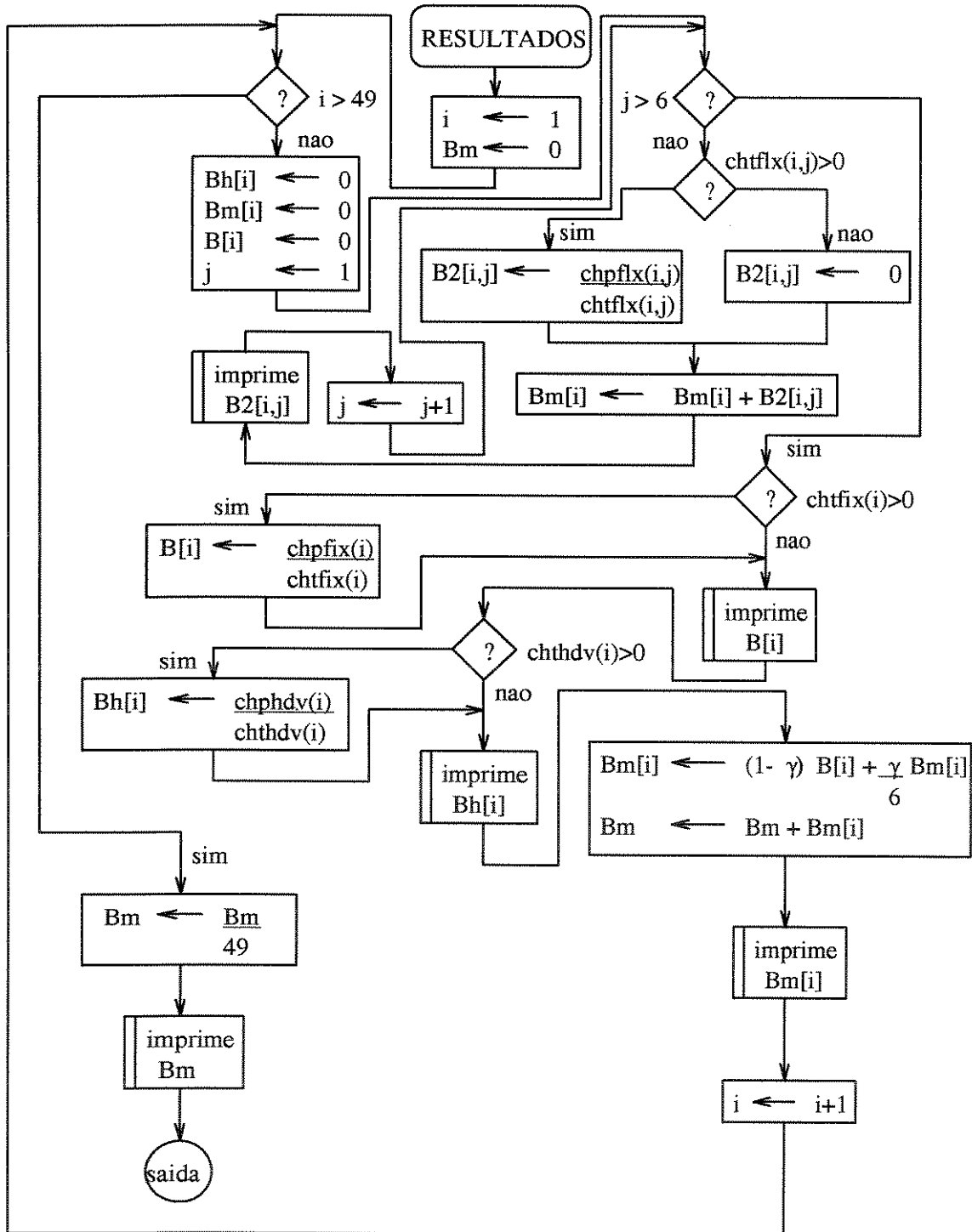


Figura E.9: Procedimento que trata dos resultados

E.9.1 Variáveis

Bh[i]: Variável que fornece o bloqueio de handover da célula i .

Bm[i]: Variável que fornece o bloqueio médio da célula i .

B[i]: variável que fornece o bloqueio da região fixa da célula i .

Bm: Variável que fornece o bloqueio médio do sistema.

chtflx(i,j): Variável que fornece o número totais de chamadas flexíveis pedidas da célula i na região de intersecção j .

chpflx(i,j): Variável que fornece o número totais de chamadas flexíveis perdidas da célula i na região de intersecção j .

B2[i,j]: Variável que fornece o bloqueio flexível da célula i na região de intersecção j .

chtfix(i): Variável que fornece o número totais de chamadas fixas pedidas da célula i .

chpfix(i): Variável que fornece o número totais de chamadas fixas perdidas da célula i .

chthdv(i): Variável que fornece o número totais de handover pedidos da célula i .

chphdv(i): Variável que fornece o número totais de handover perdidos da célula i .

Apêndice F

Fluxograma do Sistema de Tóquio

F.1 Programa Principal

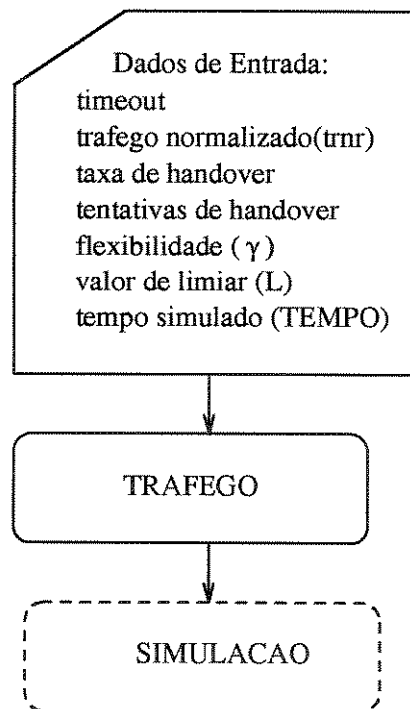


Figura F.1: Programa principal do sistema

F.2 Tráfego

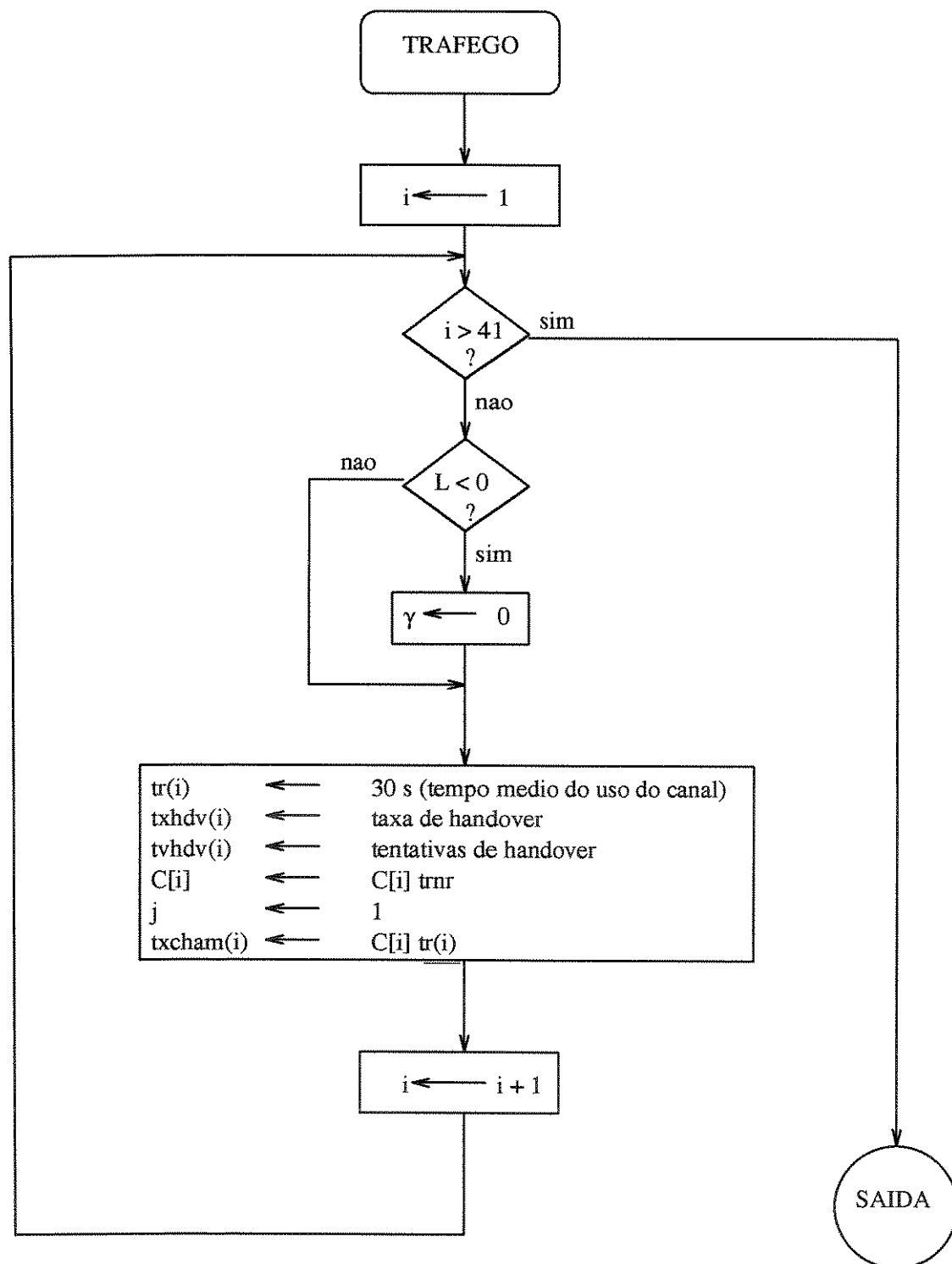


Figura F.2: Procedimento que trata do tráfego

F.3 Simulação

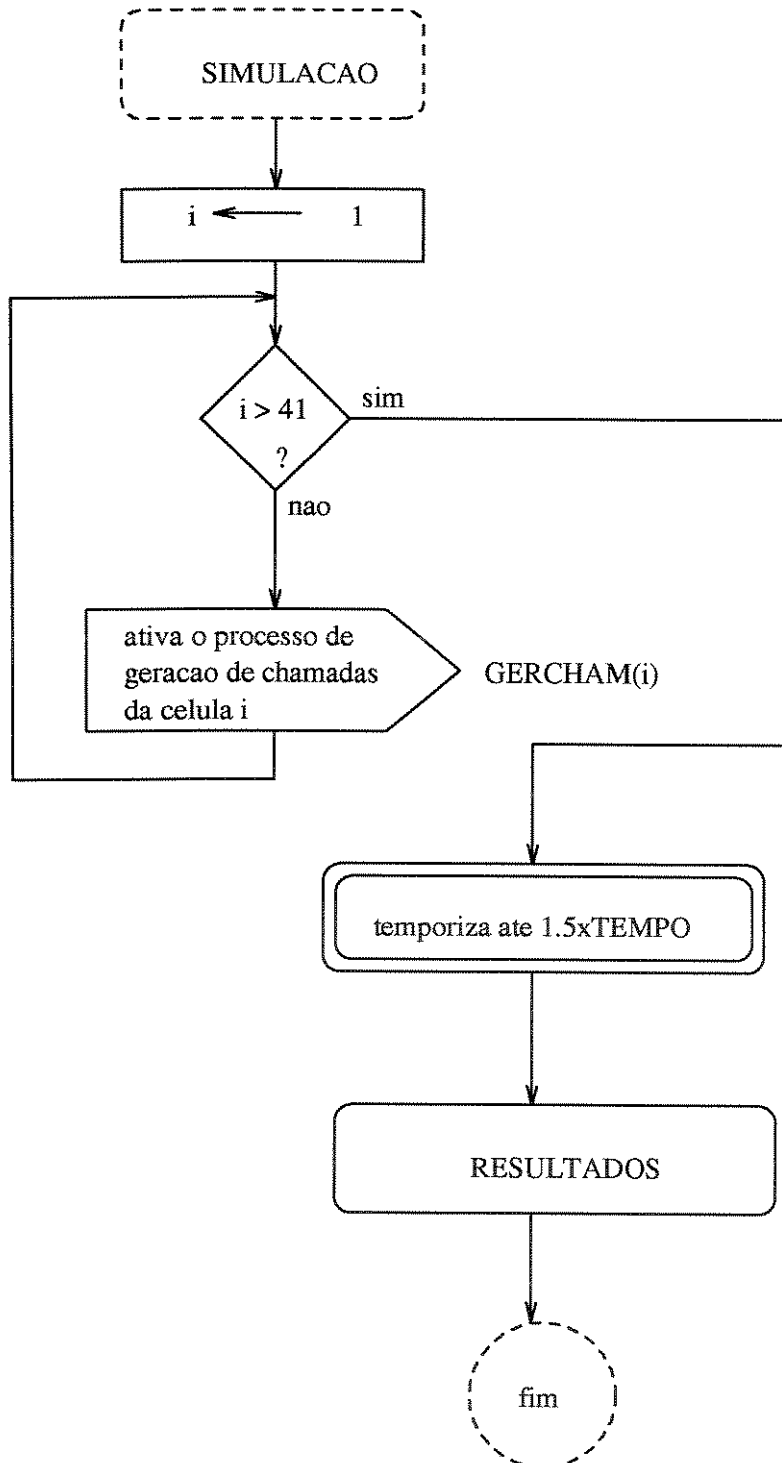


Figura F.3: Processo que trata da simulação do sistema

F.4 Geração de Chamadas

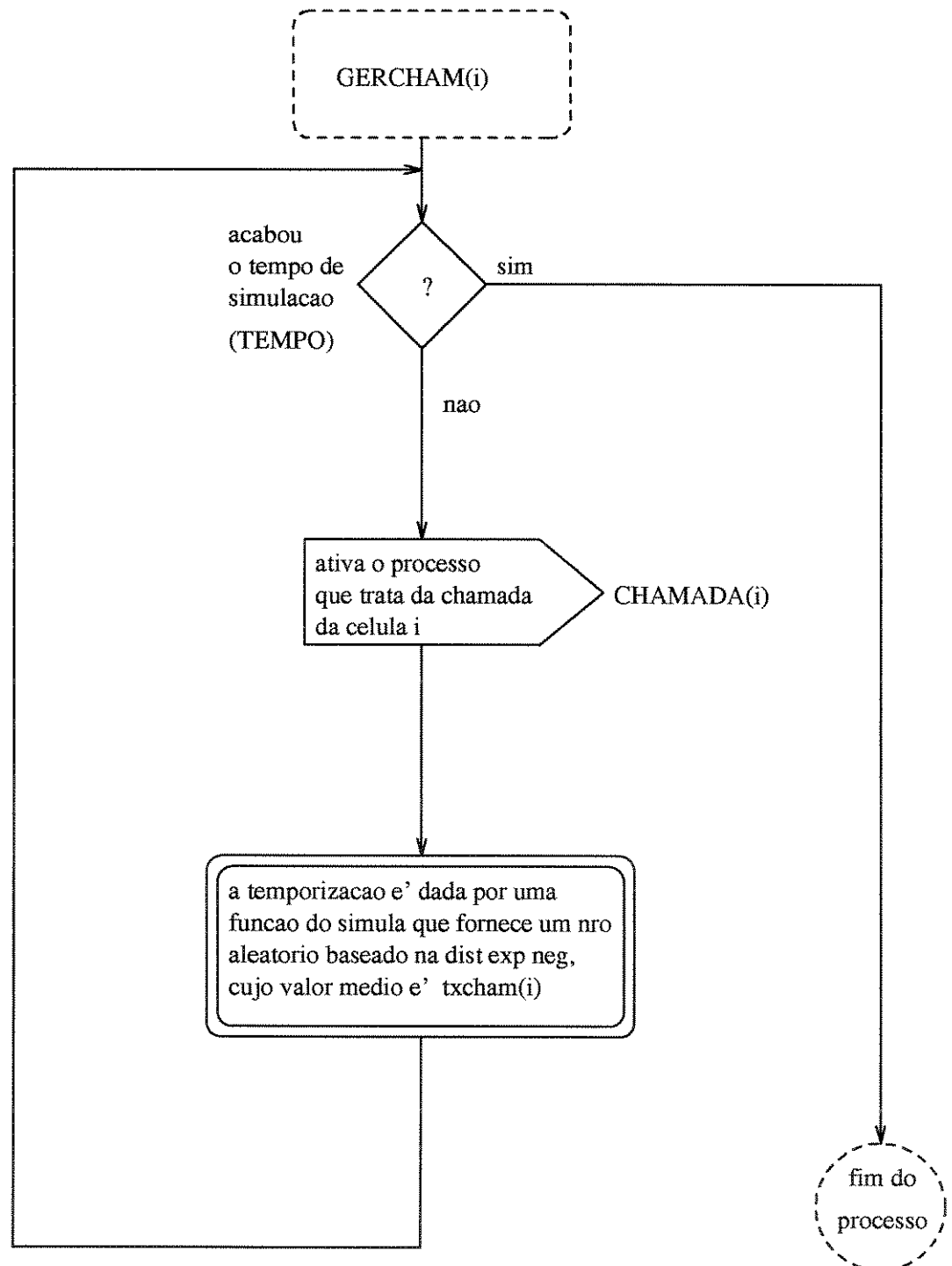


Figura F.4: Processo que trata da geração de chamadas

F.5 Chamada

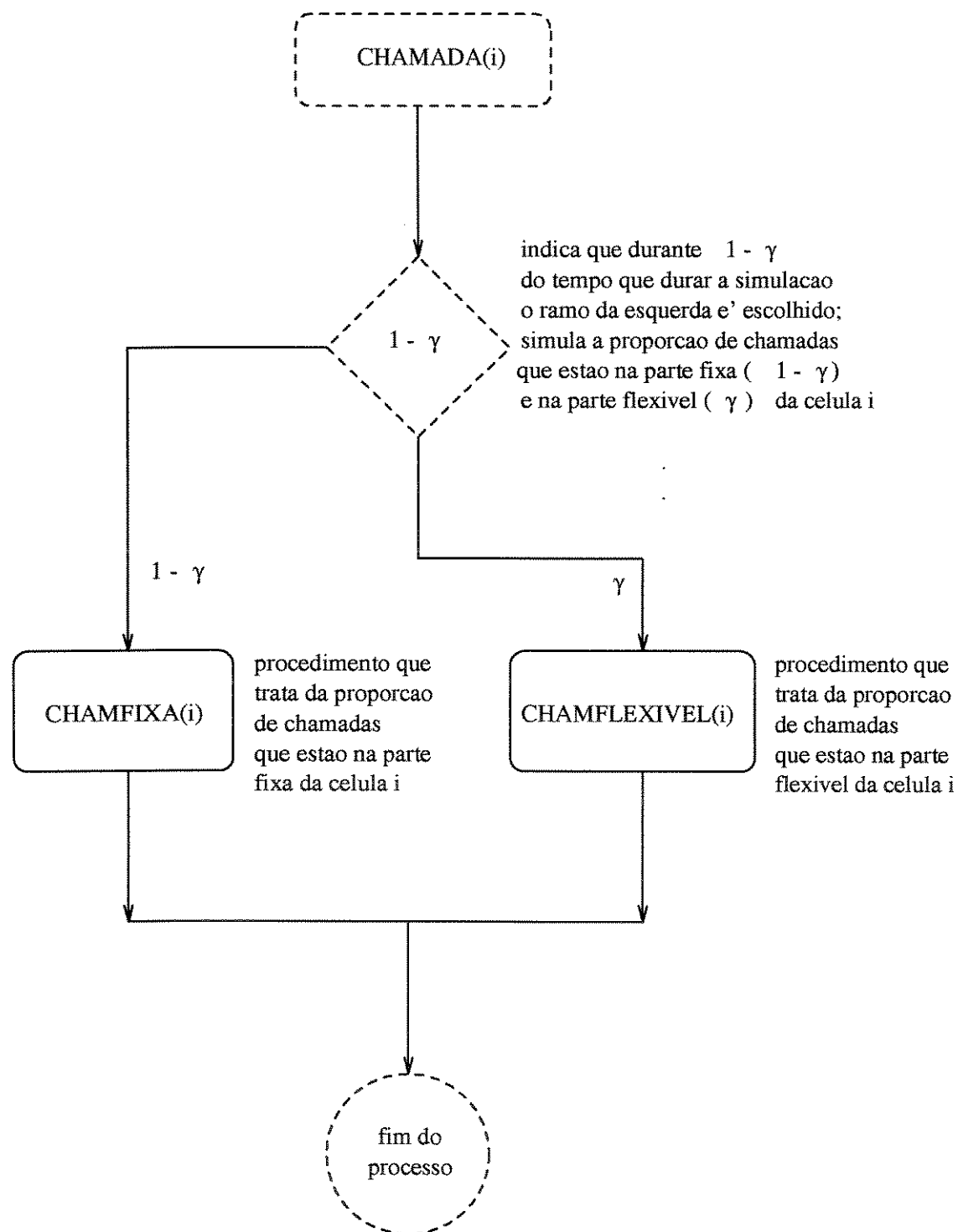


Figura F.5: Processo que trata a chamada

F.6 Chamada Fixa

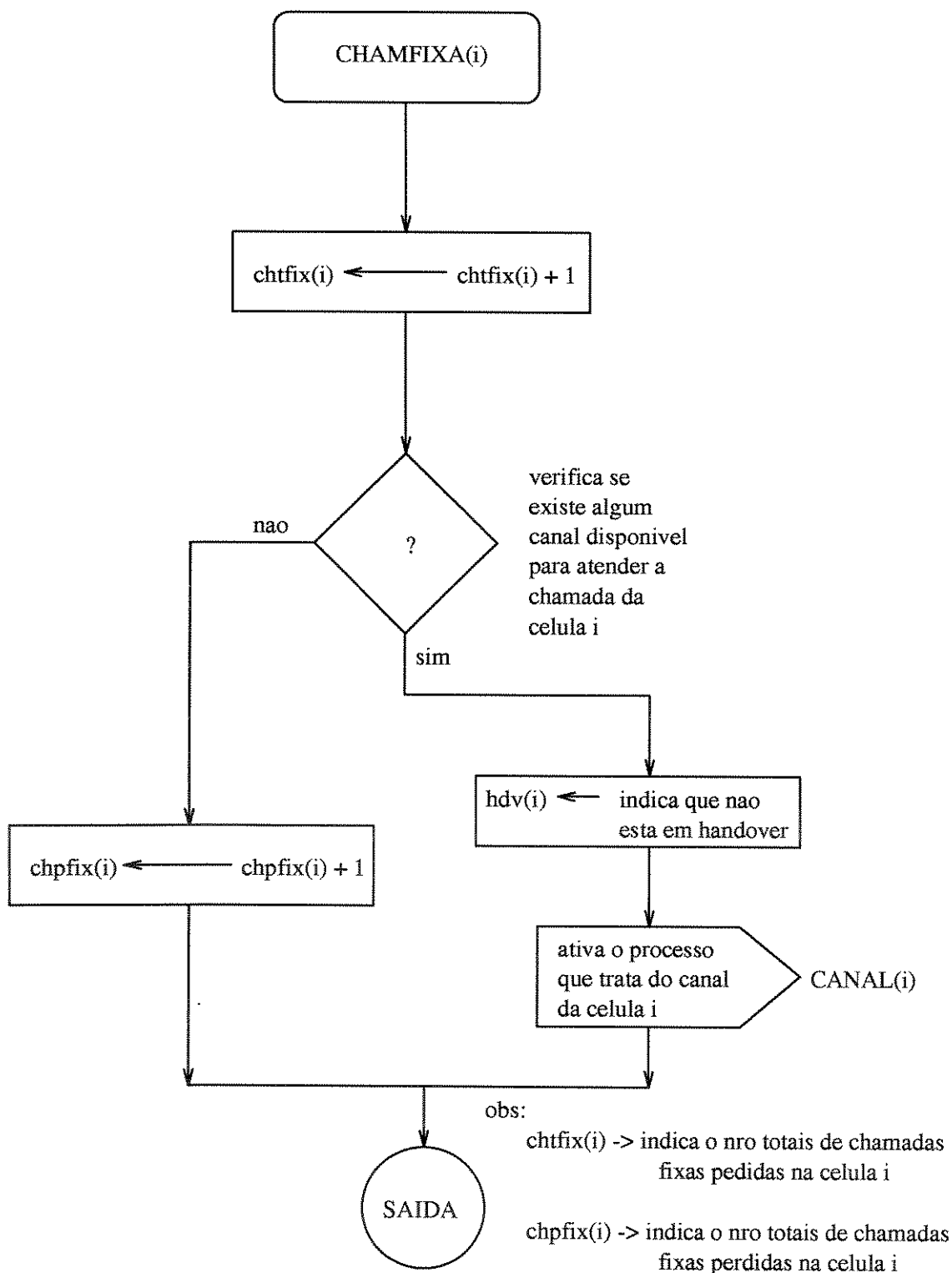


Figura F.6: Procedimento que trata da chamada fixa

F.7 Chamada Flexível

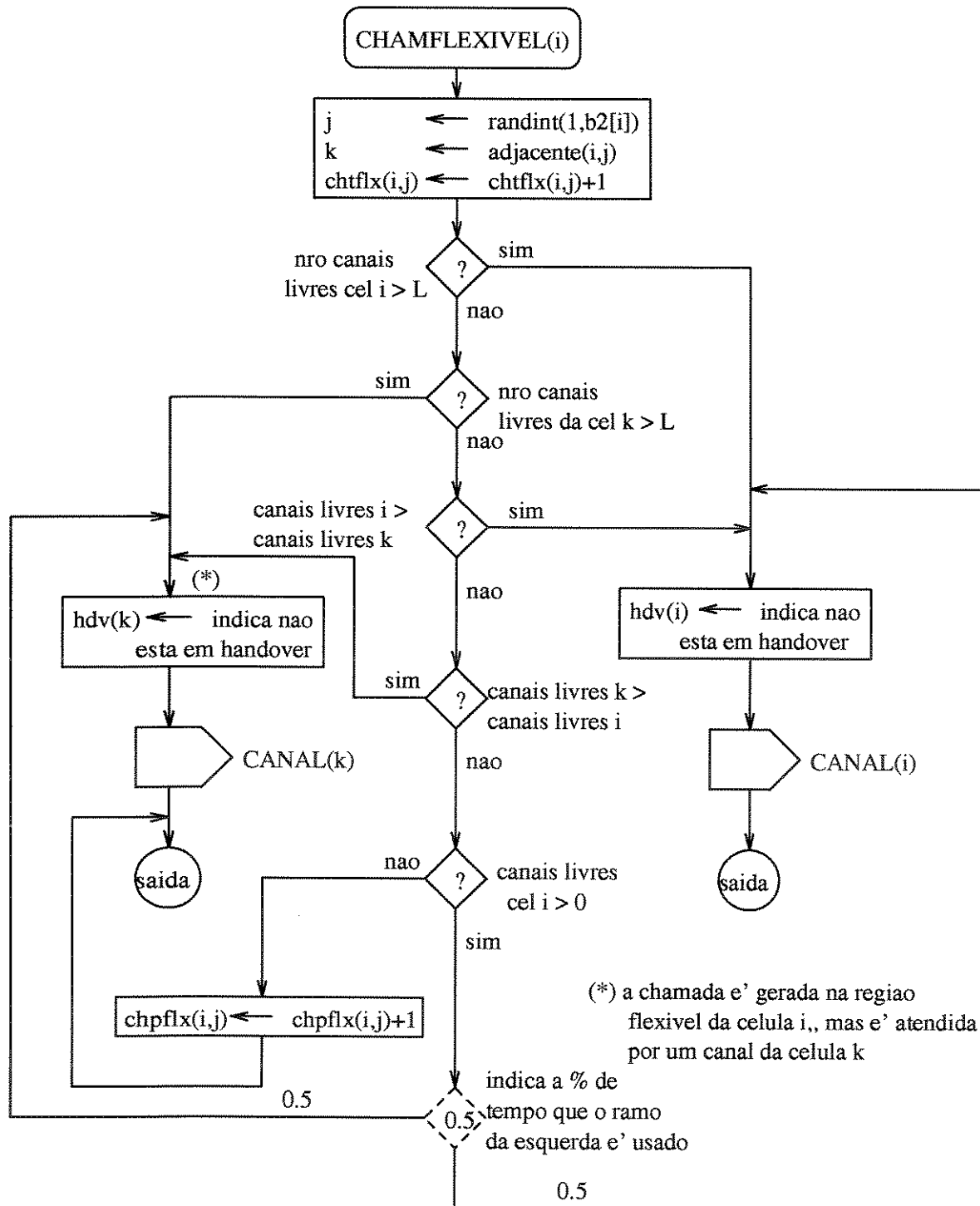


Figura F.7: Procedimento que trata da chamada flexível

F.7.1 Variáveis e Funções

b2[i]: Tabela que indica o número de células adjacentes de i .

randint(1,b2[i]): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório entre 1,2,...,b2[i] com a mesma probabilidade. Esta função simula em quais das $b2[i]$ regiões de intersecção (tráfego flexível) a chamada se encontra. Note que quaisquer das regiões tem a mesma probabilidade de ser escolhida.

adjacente(i,j): É uma tabela que fornece a célula adjacente de i na fronteira j .

chtflx(i,j): Variável que indica o número totais de chamadas flexíveis pedidas da célula i na região de intersecção j .

chpflx(i,j): Variável que indica o número totais de chamadas flexíveis perdidas da célula i na região de intersecção j .

F.8.1 Variáveis e Funções

hdv(i): Variável que indica se a chamada, que está na região fixa ou flexível da célula i , é um processo de handover.

txhdv(i): Variável que indica a proporção de chamadas originadas na célula i que fará handover.

nexp(tr(i)): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório baseado na distribuição exponencial negativa, cujo valor médio é $tr(i)$. O valor indica a duração da chamada, originada na célula i . Note que $tr(i)$ é a duração média da chamada originada na célula i .

uniform(0,tch): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório baseado na distribuição uniforme entre 0 e tch . O início ou a primeira tentativa de handover pode ocorrer em qualquer instante que durar a chamada. Isto é simulado por esta função. Note que a probabilidade de ocorrer isto é uniforme durante a duração da chamada (tch).

b2[i]: Tabela que indica o número de células adjacentes de i .

randint(1,b2[i]): É uma função do *SIMULA* que fornece um número aleatório entre 1,2,...,b2[i] com a mesma probabilidade. Esta função simula em quais das $b2[i]$ fronteiras a chamada originada na célula i fará o handover. Note que quaisquer das fronteiras tem a mesma probabilidade de ser escolhida.

adjacente(i,j): É uma tabela que fornece a célula adjacente de i na fronteira j .

chthdv(i): Variável que indica o número totais de handover pedidos da célula i .

trch(k): Variável que indica o tempo que resta da chamada originada na célula i , que terminará na célula k em virtude do handover.

tvhdv(i): Variável que indica o número de tentativas permitidas para a célula i .

to: Variável que indica o intervalo de tempo entre tentativas de handover.

chphdv(i): Variável que indica o número totais de handover perdidos da célula i .

F.9 Resultados

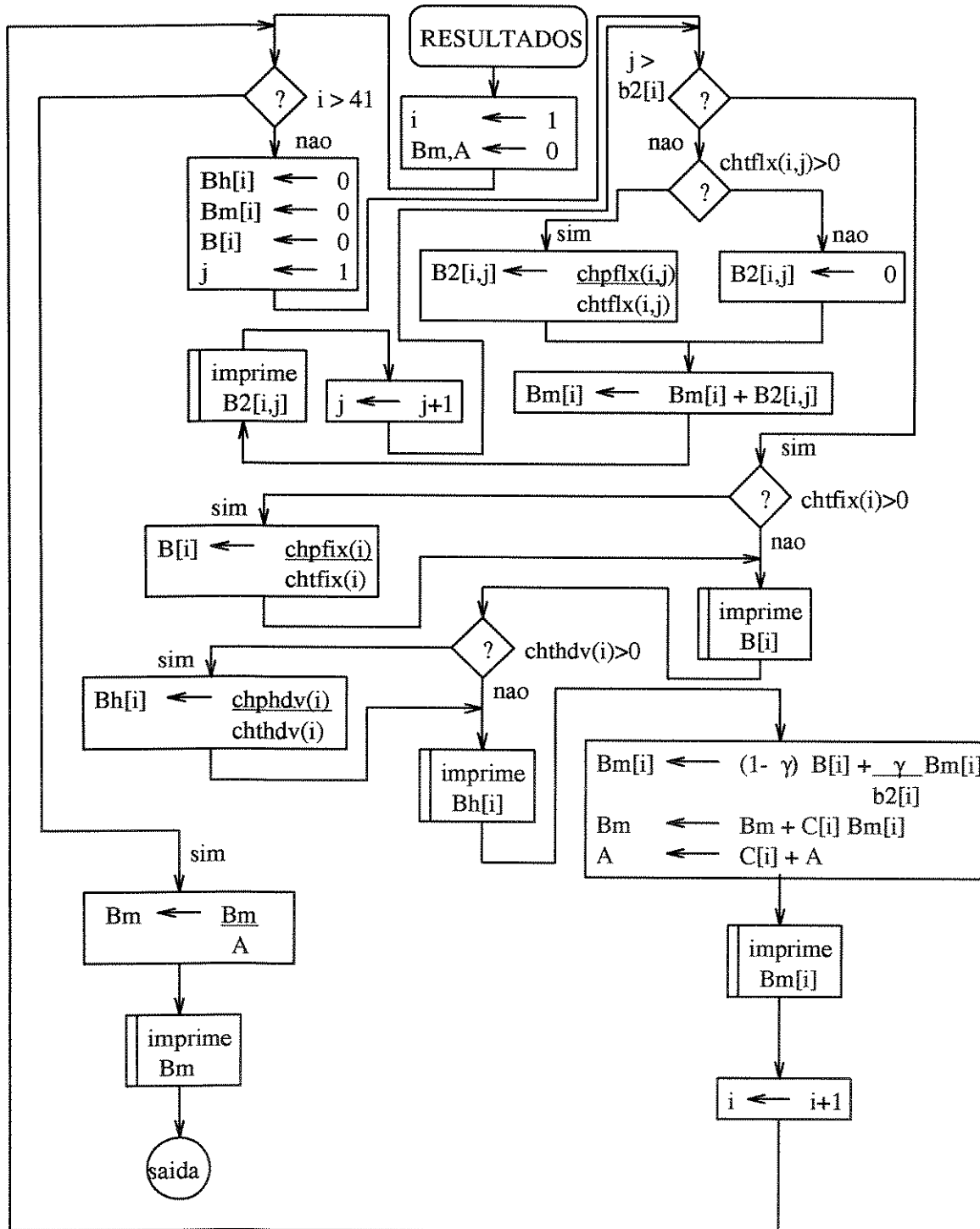


Figura F.9: Procedimento que trata dos resultados

F.9.1 Variáveis

Bh[i]: Variável que fornece o bloqueio de handover da célula i .

Bm[i]: Variável que fornece o bloqueio médio da célula i .

B[i]: Variável que fornece o bloqueio da região fixa da célula i .

Bm: Variável que fornece o bloqueio médio do sistema.

chtflx(i,j): Variável que fornece o número totais de chamadas flexíveis pedidas da célula i na região de intersecção j .

A: Variável que fornece o tráfego total do sistema.

b2[i]: Tabela que fornece o número de células adjacentes de i .

C[i]: Tabela que fornece o tráfego da célula i .

chpflx(i,j): Variável que fornece o número totais de chamadas flexíveis perdidas da célula i na região de intersecção j .

B2[i,j]: Variável que fornece o bloqueio flexível da célula i na região de intersecção j .

chtfix(i): Variável que fornece o número totais de chamadas fixas pedidas da célula i .

chpfix(i): Variável que fornece o número totais de chamadas fixas perdidas da célula i .

chthdv(i): Variável que fornece o número totais de handover pedidos da célula i .

chphdv(i): Variável que fornece o número totais de handover perdidos da célula i .

Bibliografia

- [1] Jakes Jr., W. C., *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1974, 1-7.
- [2] Parsons, J. D., Gardiner, J. G., *Mobile Communications Systems*, Blakie and Son Ltd., London, 1989.
- [3] Lee, W. C. Y., *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1982.
- [4] Holbeche, R. J., *Land Mobile Radio Systems*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1985.
- [5] —, *Novatel Cellular System — Functional Description and Theory of Operation*, Novatel Communications Ltd., Calgary, 1988.
- [6] —, *Sistema de Telecomunicações Móveis Terrestre Pública — Aspectos Gerais de Definições, Arquiteturas, Interfaces e Serviços*, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS, Relatório Interno, Campinas, 1989.
- [7] Élvio, J. L. , *Métodos Estatísticos para a Determinação da Área de Cobertura de Células e Microcélulas em Sistemas de Rádio Móvel*, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Julho de 1992.
- [8] Mencia, J. C. E. , *Desempenho de um Sistema de Comunicações Móveis com Variação do Limiar de Bloqueio*, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Janeiro de 1991.

- [9] Yacoub, M. D. , *Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries*, PhD Thesis, University of Essex, England, May, 1988.
- [10] Yacoub, M. D. , *Foundantions of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Florida, USA, 1993.
- [11] Lee, W. C. Y., “Elements of Cellular Mobile Radio Systems”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. vt-35, May 1986
- [12] Cox, D. C. and Reudink, D. O. , “A Comparision of Channel Assignment Strategies in Large-Scale Mobile Communications Systems”, IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-20, April 1972.
- [13] Eklundh, Berth, “Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry”, 11 th ITC, April 1985.
- [14] Vargas, J. H. S. , “Traffic Performance of Cellular Mobile Radio Systems” , PhD Thesis, *University of Essex*, England, June, 1988.
- [15] Backry, S. and Ackroyd, M., “Teletraffic Analysis for Multicell Mobile Radio Telephone Systems”, *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. COM-30, No 8, Aug. 1982, pp. 1905-1909.
- [16] G. M. Birtwistle, O-J Dahl, B. Myhrhaug, K. Nygaard, “ Simula Begin”, *Auerbach Publishers Inc.*, USA, 1973.
- [17] Sekiguchi, H., Ishikawa, H., Koyama, M. and Sawada, H. , “Techniques for increasing Frequency Spectrum Utilization in Mobile Radio Communication Systems”, IEEE CH2037-0/85/0000-0026, 1985, pp. 26-31.