

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica

Algoritmos de Alocação de Canais para Sistemas de Comunicação Sem Fio

Orientando

Ailton Akira Shinoda

Orientador

Michel Daoud Yacoub

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

Campinas, Abril de 1996

Este exemplar ~~de~~ ^{da} versão final da tese
defendida por AILTON AKIRA SHIMODA
pela Comissão

UNIDADE	BC
N.º DE REGISTRO:	f/UNICAMP
	sh 63a
V.	L.
Y	28135
P. C.	667/96
C	☐ X
P. C. C.	78811,00
DATA	25/07/96
N.º CIVIL	

CM-00090326-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sh63a Shinoda, Ailton Akira
Algoritmos de alocação de canais para sistemas de
comunicação sem fio / Ailton Akira Shinoda.--Campinas,
SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Michel Daoud Yacoub.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica.

1. Sistemas de comunicação móvel. 2. Algoritmos. 3.
Radio celular. 4. Método de Monte Carlo. I. Yacoub,
Michel Daoud. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica. III. Título.

Resumo

Técnicas Locais de Alocação - *TLA* -, caracterizadas por algoritmos que manipulam o tráfego com acesso a mais de uma estação rádio base -, e Técnicas Globais de Alocação - *TGA* -, compreendendo as várias formas de alocação dinâmica de canais, são investigadas em sistemas de comunicação sem fio. Propõem-se um procedimento de rearranjo de canais aplicado às *TLA* e um outro às *TGA*. Propõe-se, também, a combinação das *TLA* e *TGA* em uma técnica comum. Propõem-se, ainda, cinco algoritmos de alocação pertencendo ao grupo *TGA*. Os sistemas celulares sob investigação incluem: 1) Sistema Infinito Balanceado; 2) Sistema Infinito Desbalanceado; e 3) Sistema Real. Dada a intratabilidade analítica do problema, a análise de desempenho destas propostas é feita através de simulação de *Monte Carlo*. O procedimento de rearranjo aplicado às *TLA* usa as mesmas regras de decisão da própria técnica e o aumento da performance devido ao rearranjo é substancial. As técnicas combinadas apresentam um desempenho notável, muito superior àquele obtido pelas técnicas individualmente. Ao contrário das *TGA* conhecidas, que, relativamente à alocação fixa de canais, desempenham melhor para baixo tráfego e pior para alto tráfego, as técnicas globais de alocação propostas neste trabalho procuram otimizar a eficiência espectral obtendo-se, assim, um notável desempenho em qualquer situação. De fato, estas técnicas adotam procedimentos de auto-organização migrando convenientemente da alocação totalmente dinâmica para a completamente fixa e vice-versa de acordo com o perfil de tráfego. Os ganhos são obtidos às custas de outros fatores que incluem o aumento do nível de interferência, quando se usam as *TLA*, ou então da complexidade do algoritmo, quando se usam as *TGA*.

Agradecimentos

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) da TELEBRÁS pela oportunidade oferecida. Em particular aos amigos Edvaldo Paro, Geraldo Lopes Serodio, Guilherme Dias dos Santos, José Luiz Malavazi e Paulo Xavier Filho.

Aos caros amigos Omar Carvalho Branquinho e Ralph Robert Heinrich por terem conduzido a difícil tarefa de sustentar este trabalho no âmbito das pesquisas do CPqD.

Aos amigos do CPqD e da UNICAMP, companheiros e incentivadores nesta jornada. Em especial a Cássio Luis Batista, Flávio Bueno Brandão Filho, Paulo Cardieri e Roberto Petry.

A Michel Daoud Yacoub, meu amigo e orientador, pelo apoio durante todo o período de estudos.

*À minha esposa Noriko
pelo carinho e incentivo.*

Conteúdo

1	Introdução	3
1.1	Rádio Móvel Celular	4
1.2	Arquitetura Básica	5
1.2.1	Centro de Operação e Manutenção	6
1.2.2	Centro de Controle e Comutação	7
1.2.3	Estação Rádio Base	7
1.2.4	Estação Móvel	7
1.3	Planejamento do Sistema	8
1.4	Objetivo do Trabalho	9
1.5	Plano do Trabalho	10
1.6	Contribuições do Trabalho	10
2	Técnicas de Alocação de Canais	13
2.1	Introdução	13
2.2	Técnicas Globais de Alocação	15
2.2.1	Alocação Fixa de Canais	15
2.2.2	Alocação de Canais por Empréstimo	16
2.2.3	Alocação Dinâmica de Canais	36
2.2.4	Alocação Híbrida de Canais	51
2.3	Técnicas Locais de Alocação	52
2.3.1	Adaptação pela Média (Mean Adaptation - MAP)	53

2.3.2	Resposta Adaptativa ao Bloqueio (Adaptive Response to Blocking - ARB)	54
2.3.3	Adaptação a Média e ao Bloqueio (Adaptation to Mean and Blocking - AMB)	54
2.3.4	Adaptação Instantânea (Instantaneous Adaptation - IAP)	54
2.3.5	Adaptação Instantânea e pela Média (Instantaneous and Mean Adaptation - IMA)	55
2.3.6	Variação do Limiar de Bloqueio (VLB)	55
2.4	Sumário e Conclusões	55
3	Modelo de Tráfego e Sistemas de Grande Porte	57
3.1	Modelo de Tráfego	58
3.2	Geração de Tráfego Móvel	59
3.3	Handoff	61
3.4	Parâmetros de Desempenho	64
3.4.1	Probabilidade Média de Bloqueio	64
3.4.2	Desbalanceamento de Tráfego	65
3.4.3	Avaliação do Parâmetro Desbalanceamento	68
3.4.4	Extensão do Conceito de Desbalanceamento	69
3.5	Sistemas Celulares Considerados	69
3.5.1	Sistema Infinito Balanceado	70
3.5.2	Sistema Infinito Desbalanceado	72
3.5.3	Sistema Real	75
3.6	Sumário e Conclusões	78
4	Modelo de Tráfego Estendido	81
4.1	Assinantes com Acesso a mais de uma Célula	81
4.2	Benefícios Potenciais do Encaminhamento Alternativo	83
4.3	Parâmetros de Tráfego e Medidas de Desempenho	83
4.3.1	Parâmetros	84

CONTEÚDO	vii
4.3.2 Fluxos de Tráfego	85
4.3.3 Medidas de Desempenho	86
4.4 Sumário e Conclusões	87
5 Variação do Limiar de Bloqueio e Rearranjo de Chamadas	89
5.1 Variação do Limiar de Bloqueio (VLB)	90
5.2 Rearranjo	92
5.3 Resultados	94
5.3.1 Bloqueio Médio Versus Flexibilidade	95
5.3.2 Bloqueio Médio Versus Tráfego	99
5.4 Sumário e Conclusões	103
6 Técnicas Globais e Locais Combinadas	105
6.1 Alocação por Empréstimo de Canais e Variação do Limiar de Bloqueio: AEC-VLB	107
6.2 Alocação Híbrida de Canais e Variação do Limiar de Bloqueio: AHC-VLB	107
6.3 Channel Borrowing Without Locking e Variação do Limiar de Bloqueio: CBWL-VLB	108
6.4 Validação do Modelo - Pontos de Verificação	111
6.5 Resultados	112
6.5.1 Bloqueio Médio Versus Flexibilidade	112
6.5.2 Bloqueio Médio Versus Tráfego	119
6.6 Sumário e Conclusões	126
7 Técnicas Globais de Alocação: Propostas	129
7.1 Características Básicas da ADC	130
7.1.1 Taxa de Bloqueio	131
7.1.2 Bloqueio de Handoff	132
7.1.3 Equipamento RF	133
7.1.4 Complexidade do Algoritmo	133

7.2	Principais Estratégias ADC	134
7.2.1	Estratégias ADC Convencionais	134
7.2.2	Estratégias ADC Usando Alocação Otimizada de Canais	136
7.2.3	Estratégias ADC Usando Monitoração do Canal	137
7.3	Propostas ADC e Rearranjo	138
7.3.1	Definições e Princípios Básicos ADC	139
7.3.2	Proposta A: Maior Número de Co-Células na Distância Mínima de Reuso	139
7.3.3	Proposta B: Bloqueio Forçado	140
7.3.4	Proposta C: Bloqueio Forçado pelo Grau de Serviço	140
7.3.5	Proposta D: Bloqueio Forçado pelos Canais Impedidos	141
7.3.6	Proposta E: FA para Baixo Tráfego e Bloqueio Forçado para Alto Tráfego	141
7.3.7	Rearranjo	142
7.4	Resultados	143
7.5	Sumário e Conclusões	150
8	Conclusões	153
8.1	Introdução	153
8.2	Conclusões Gerais	154
8.3	Contribuições do Trabalho	157
8.4	Trabalhos Futuros	158
A	Prabhu e Rappaport	159
A.1	Hipóteses	159
A.2	Método Clássico Baseado nas Equações de Estado	160
A.3	Método 1	161
A.4	Método 2	163
B	Sengoku, Itoh e Matsumoto	167

CONTEÚDO	1
C Raymond	171
C.1 Alocação de Canal	172
C.2 Máximo Empacotamento	172
C.2.1 Descrição	172
C.2.2 Alocação para Sistema Linear	173
C.3 Clique Packing	174
C.4 Alocação de Markov	175

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, Hertz demonstrou sua potencialidade ao transmitir um sinal de rádio de um ponto fixo em terra a um barco distante 18 milhas [1]. 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, utilizavam comunicação unidirecional, no sentido estação fixa para estação móvel [2]. O aumento da demanda e o desenvolvimento tecnológico estimularam o uso de frequências mais altas nas décadas seguintes. Em 1946 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) [1]. Em 1969 um sistema *full duplex* com encaminhamento automático, operando em 450 MHz, tornou-se disponível nos EUA [1]. Em 1974 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 [3].

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 para 1991 aproximadamente 50 mil assinantes móveis na Suécia [2]. Este número foi alcançado em 1984. O crescimento anual gira em torno de 40%, e não há indicações de saturação. Em meados de 1993 havia 25 milhões de usuários no mundo, e pesquisas de mercado apontam para 100 milhões de assinantes no ano 2000 [4].

Este crescimento significativo deve continuar nos próximos anos com a implantação do serviço de comunicação pessoal (PCS), para o qual 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 rádio móvel terrestre é constituído basicamente por estação móvel (EM), por um centro de comutação e controle (CCC) e por uma estação rádio base (ERB). Enlaces de rádio ligam as EMs à ERB, e esta, por sua vez, conecta-se, por meio de enlaces fixos (cabos, links de rádio), à CCC.

Nos primeiros sistemas, os *Sistemas Móveis Convencionais*, geralmente uma única ERB 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 [5]:

- a grande separação geralmente necessária entre as ERBs 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 necessidades 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 ERBs e EMs 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 ERB. 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*).

1.2 Arquitetura Básica

A estrutura básica do Sistema Móvel Celular, apresentada na Figura 1.1, engloba, em geral, as seguintes partes: Centro de Operação e Manutenção (COM), Centro de Controle e Comutação (CCC), Estação Rádio Base (ERB) e Estação Móvel (EM) [6].

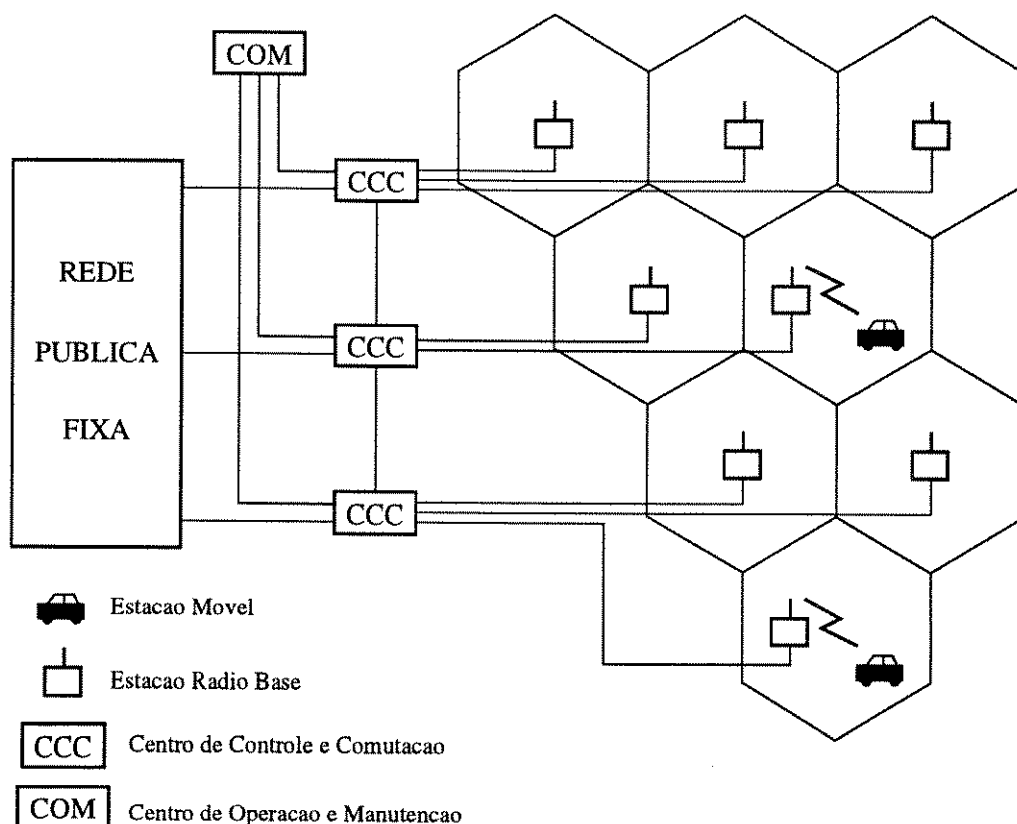


Figura 1.1: Arquitetura Básica do Sistema Móvel Celular.

1.2.1 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 [7]:

- Manter bases de dados da configuração do sistema e dos assinantes presentes em sua área de atuação. Parte destas informações está presente também nos Centros de Controle e Comutação.
- Coletar e processar dados estatísticos de 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.

1.2.2 Centro de Controle e Comutação

O Centro de Controle e Comutação é o elo de ligação entre as várias Estações Rádio Base a ele subordinadas e a rede telefônica pública. Suas principais funções são [7]:

- Alocar e gerenciar os canais (voz e controle) das Estações Base 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.

1.2.3 Estação Rádio Base

A Estação Rádio 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 [7]:

- 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.

1.2.4 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 [7]:

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

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 [7]. 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 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 ERBs 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 ERBs. Com as células definidas e as ERBs 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.

1.4 Objetivo do Trabalho

Em planejamento de sistema uma das etapas mais relevantes refere-se à alocação de canais. Nos sistemas em uso os canais são determinados levando-se em conta um perfil pré-determinado descrevendo a distribuição geográfica do tráfego e o grau de serviço que se pretende. A alocação dos canais é, então, feita de maneira permanente sendo sua distribuição levada a cabo de forma a se minimizar os efeitos da interferência de canal adjacente e co-canal. Recentemente, este tipo de alocação - conhecida como fixa - é feita de forma a se ter a melhor eficiência espectral, mas é ineficaz na presença de uma variação do tráfego para o qual foi dimensionada.

Vários algoritmos, então, têm sido propostos e largamente analisados na literatura, como uma alternativa à Alocação Fixa de Canais. As pesquisas nesta área parecem ter sido intensificadas com o advento dos Sistemas de Comunicações Pessoais (*Personal Communications Systems - PCS*). A disputa *TDMA* (*Time Division Multiple Access*) versus *CDMA* (*Code Division Multiple Access*) também tem tido uma parcela significativa nisto, já que a alocação de canais é certamente um fator preponderante na performance do tráfego de sistema.

Este trabalho tem por objetivo a proposta e a análise de algoritmos de alocação de canais em sistemas rádio móveis. A investigação visa sistemas celulares de grande porte com diferentes distribuições de tráfego e outras características, como rearranjo de chamadas, que reconhecidamente torna o problema analiticamente intratável. A avaliação da performance do sistema deverá, então, ser feita através de simulações.

1.5 Plano do Trabalho

O Capítulo 2 tem por objetivo descrever os principais algoritmos de alocação de canais disponíveis na literatura. Os algoritmos são reunidos em duas categorias: *Técnicas Globais de Alocação* e *Técnicas Locais de Alocação*.

O Capítulo 3 analisa os aspectos qualitativos e quantitativos para a modelagem dos fenômenos de tráfego envolvidos num sistema celular de grande porte. Em particular definem-se os parâmetros de desempenho e os sistemas celulares a serem utilizados neste trabalho. Propõe-se neste ponto um parâmetro de desbalanceamento no auxílio da medida de desempenho.

O Capítulo 4 estende os conceitos apresentados no Capítulo 3 para sistemas celulares onde o acesso rádio a mais de uma estação base está presente.

O Capítulo 5 propõe um algoritmo de rearranjo de chamadas para melhoria de desempenho da técnica apresentada em [8].

O Capítulo 6 propõe a combinação de *Técnicas Globais de Alocação* e *Técnicas Locais de Alocação*.

O Capítulo 7 propõe cinco algoritmos do tipo *Alocação Dinâmica de Canais* levando-se em conta a distância mínima de reuso, quantidade de co-células ativas, grau de serviço, quantidade de canais impedidos. Propõe-se ainda um algoritmo de rearranjo de chamadas.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos nessa área.

1.6 Contribuições do Trabalho

Este trabalho de tese propõe diversos algoritmos de alocação de canais com o objetivo de melhorar o desempenho de tráfego de sistemas rádio móveis, incluindo também procedimento de rearranjo de chamadas. As principais contribuições incluem:

- Proposta de um parâmetro de auxílio - o desbalanceamento - constituindo uma escala de 0 a 1 que se avalia o nível de desbalanceamento de tráfego do sistema.

- Proposta de um algoritmo de rearranjo de chamadas para técnicas locais de alocação de canais.
- Proposta de algoritmos onde se combinam técnicas globais de alocação e técnicas locais de alocação de canais.
- Proposta de técnicas globais de alocação em que combinam-se as vantagens dos algoritmos de alocação dinâmica com os de alocação fixa sendo que o algoritmo final migra de uma para outra técnica dinamicamente com a variação da distribuição de tráfego.
- Proposta de um algoritmo de rearranjo de chamadas para técnicas globais de alocação de canais.

Capítulo 2

Técnicas de Alocação de Canais

Este capítulo tem por objetivo descrever os principais algoritmos de alocação de canais. Os algoritmos são agrupados em duas categorias: *Técnicas Globais de Alocação* e *Técnicas Locais de Alocação*. As técnicas globais de alocação reúnem quatro classes: Alocação Fixa de Canais, Alocação por Empréstimo de Canais, Alocação Dinâmica de Canais, e Alocação Híbrida de Canais. As técnicas locais de alocação reúnem seis algoritmos: Adaptação pela Média, *Directed Retry*, Adaptação pela Média e Bloqueio, Adaptação Instantânea, Adaptação Instantânea e pela Média, e Variação do Limiar de Bloqueio.

2.1 Introdução

As técnicas de alocação de canais desempenham um papel importante na eficiência espectral dos sistemas rádio móvel e constituem um vasto campo ainda por ser explorado. Em geral, as técnicas de alocação de canais podem ser agrupados em duas categorias: *Técnicas Globais de Alocação (TGA)* e *Técnicas Locais de Alocação (TLA)*.

O grupo TGA é caracterizado por dois extremos: Alocação Fixa de Canais (*AFC*) e Alocação Dinâmica de Canais (*ADC*). Em AFC os canais são alocados de maneira permanente de acordo com o perfil de tráfego do sistema. Em ADC os canais são alocados de maneira dinâmica de acordo com a demanda de tráfego. Entre estes extremos um grande número de algoritmos tem sido proposto tentando combinar a máxima eficiência

espacial no reuso de canais, como em AFC, e a adaptabilidade às variações bruscas do padrão de tráfego, como em ADC.

O grupo TLA é caracterizado por estratégias de encaminhamento alternativo em que o tráfego da área de sobreposição entre células adjacentes é utilizado. A estratégia mais conhecida neste grupo é a *Directed Retry* [9].

Os sistemas atuais utilizam a alocação fixa, embora alguns já tenham experimentado a fixa combinada à *Directed Retry*.

A implementação de outras técnicas de alocação de canais é, em geral, complicada devido ao alto grau de envolvimento de processamento central requerido. Técnicas menos complexas existem, mas os algoritmos de alocação nunca tiveram a atenção devida dos fabricantes. É provável que, com o advento do PCS (*Personal Communication System*) onde a mobilidade do assinante aumenta e, conseqüentemente, a imprevisibilidade do comportamento do tráfego é maior, as técnicas de alocação de canais sejam melhor aproveitadas. O perfil de tráfego dos sistemas rádio móvel, devido exatamente à característica inerente ao sistema - a mobilidade do assinante -, é bastante imprevisível. Em condições de extrema normalidade, no entanto, pode-se delineá-lo como tendo um formato de *sino* ou de *sino invertido*. Por exemplo, no horário de *rush* uma alta concentração de usuários localiza-se no *centro* enquanto que na periferia a demanda pelo serviço é menor (*formato sino*). No final do dia a demanda no centro *diminui* e *cresce* o tráfego na periferia à medida que os usuários se movem para as suas residências (hora de maior movimento - *HMM*). Na distribuição de canais deve ser levado em consideração o nível de tráfego na hora do *rush* além da possibilidade de alterações devido à mobilidade dos usuários (congestionamentos, eventos especiais, bloqueio de estradas, etc).

A parte mais onerosa na implementação de um serviço celular são as *rádios base*. O *eficiente* uso de cada uma delas é crucial. Para a *otimização* de seu uso um compromisso deve ser feito entre a necessidade de *células menores* para atender um tráfego *maior*, e a necessidade de cobrir o *maior* espaço com o *mínimo* de estações base.

2.2 Técnicas Globais de Alocação

As Técnicas Globais de Alocação compreendem quatro classes de algoritmos: Alocação Fixa de Canais, Alocação por Empréstimo de Canais, Alocação Dinâmica de Canais, e Alocação Híbrida de Canais. Afora a Alocação Fixa de Canais, todas as demais classes constituem pesquisas exploratórias, nunca tendo sido implementadas na prática.

2.2.1 Alocação Fixa de Canais

Nesta técnica um número *fixo* de canais do sistema é alocado a cada célula. Os mesmos canais são alocados também a outra célula respeitando-se uma distância de reuso de modo a se minimizar a *interferência 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 desastrosos* no sistema.

O problema de alocação de canais para as células em um sistema rádio móvel é similar à questão de alocação de cores diferentes a áreas adjacentes em um *grafo*. Alguns conceitos teóricos sobre coloração de grafos podem ser encontrados em [10, 11].

Bron e Kerbosch [12] publicaram um trabalho onde se ilustra a complexidade do uso das técnicas de grafos. O algoritmo requer muito tempo de processamento para um sistema com vários *nós*, ou células no caso de sistemas de telefonia móvel. Estas soluções são aproximadas e são exageradamente elaboradas para a solução de sistemas de baixa complexidade.

Zoellner e Beall [13] apresentaram uma avaliação de processos de alocação de frequências baseadas em teorias de grafos.

Box [14] publicou uma técnica heurística. No algoritmo proposto, a alocação de canais é feita de acordo com uma prioridade inicial estimada. No caso de falha, uma outra é estimada até se encontrar a solução adequada.

Hale [15] fez um estudo onde mostrava a equivalência de problemas de coloração de grafos com problemas de alocação de canais.

Dikoku e Ohdate [16] apresentaram um método para a obtenção do número ótimo de canais para um *cluster*, quando se usa um sistema com células pequenas.

Gardiner e Kotsopoulos [17] fizeram um estudo sobre a mínima apuração entre canais adjacentes permanentemente alocados a uma célula. Eles apresentaram uma comparação do número de canais disponíveis por célula como uma função do tamanho do *cluster*, e a mínima separação entre canais.

Meyerhoff [18] desenvolveu um método de ótima configuração de alocação de canais (fixos) considerando interferência co-canal e separação de canais adjacentes.

Chan e Mahmoud [19] propuseram um algoritmo de alocação eficiente provendo uma distribuição de canais, livres de interferências.

Os algoritmos de alocação fixa há muito deixaram de despertar interesse de investigação dado o desafio que constitui a pesquisa de algoritmos das demais classes. Na prática tabelas de alocação estão disponíveis e são consultadas quando da concepção do sistema.

2.2.2 Alocação de Canais por Empréstimo

Nesta técnica uma célula que tem *todos* os seus canais ocupados procura um canal livre na célula *vizinha*. Se nesta célula vizinha não houver canais livres, então a chamada é *bloqueada*.

Engel e Peritsky

Engel e Peritsky [20] propuseram três estratégias de alocação de canais por empréstimo. Um sistema com *três* células e *quatro* canais, conforme a Figura 2.1, descreve, de maneira simples, a operação dos algoritmos. Suponha que as células *A*, *B*, e *C* estejam localizadas de maneira que transmissões simultâneas do *mesmo* canal nas células *A* e *B* ou células *B* e *C* sofram interferência, e que as células *A* e *C* estejam suficientemente distantes para que não haja interferência co-canal. Suponha também que cada célula necessite somente de *dois* canais para atender o tráfego com uma baixa probabilidade de bloqueio. Sob estas

condições, os canais 1 e 2 serão alocados às células A e C e os canais 3 e 4 serão alocados à célula B. Isto é mostrado na Figura 2.1 como *canais nominais*.

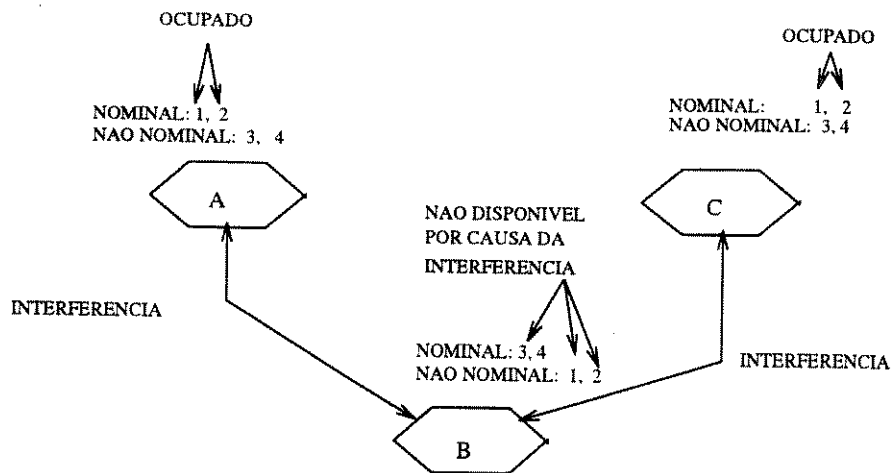


Figura 2.1: Estado do sistema antes da aplicação do primeiro algoritmo.

Os *canais não nominais*, ou de empréstimo, são aqueles que podem ser usados na célula mas que têm o potencial de ocasionar interferência co-canal nos canais nominais das outras células. A seguir são descritos os três algoritmos propostos.

a - Primeiro Algoritmo. Considere duas chamadas originadas na célula A. Estas chamadas devem ser arbitrariamente alocadas aos canais nominais 1 e 2. Analogamente, considere duas outras chamadas ocorrendo na célula C. Elas também devem ser alocadas aos canais nominais 1 e 2. Considere agora uma nova chamada na célula A, e que ela seja alocada ao canal não nominal 3. O estado do sistema após estas alocações é ilustrado na Figura 2.1.

Admita uma chamada originada na célula C. Se a chamada for alocada ao canal 4, então a célula B ficará com indisponibilidade de canais ocasionando uma alta probabilidade de bloqueio futura. Por outro lado, se a chamada for alocada ao canal 3 a célula B ficará com disponibilidade de um canal. Assim, a chamada deverá ser alocada ao canal 3.

No exemplo citado, existem dois canais candidados a escoar a chamada e somente uma célula interferente. No caso geral, haverá muitos candidatos e várias células interferentes. Assim, cada um deles deverá ser considerado. Para cada situação calcula-se a probabilidade condicional de bloqueio que ocorrerá nas células interferentes, e a maior das probabilidades (em relação às células interferentes) é associada ao candidato. Ao final, o candidato que possuir a menor das máximas probabilidades condicionais será o escolhido.

b - Segundo Algoritmo. Este algoritmo é uma extensão do anterior. Continuando com o exemplo dado, suponha que todas as chamadas tenham sido efetuadas. A Figura 2.2 ilustra o estado do sistema.

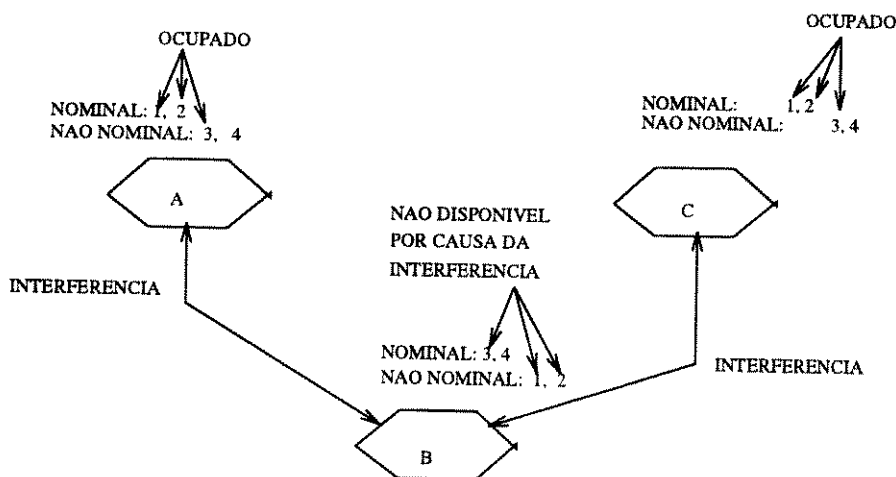


Figura 2.2: Estado do sistema após a aplicação do primeiro algoritmo.

Suponha uma nova chamada na célula C, alocada ao canal 4. Suponha ainda que a chamada utilizando o canal 1 na célula C termine. A Figura 2.3 ilustra o estado do sistema.

Na célula C não é desejável deixar o canal nominal livre enquanto os canais não nominais estão ocupados pois, por definição, os canais nominais foram estatisticamente determinados para que não houvesse interferência com outros canais nominais. Assim, na célula C, a chamada do canal 3 ou do canal 4 deverá ser transferida para o

canal nominal 1. Novamente, existem 2 candidatos para a seleção. Se a chamada é transferida do canal 3, a probabilidade de bloqueio na célula *B* permanece alta, pois o uso do canal 3 na célula *A* continua impedindo seu uso na célula *B*. Se a chamada é transferida do canal 4, a probabilidade de bloqueio na célula *B* diminui. Assim, a chamada deve ser transferida do canal 4 para o canal 1 na célula *C*. Em geral, este algoritmo possibilita a transferência de serviço de canais não nominais para canais nominais sempre que os canais nominais ficam livres. A escolha do canal não nominal a ser rearranjado (liberado) é novamente feita de forma a minimizar a máxima probabilidade de bloqueio futura.

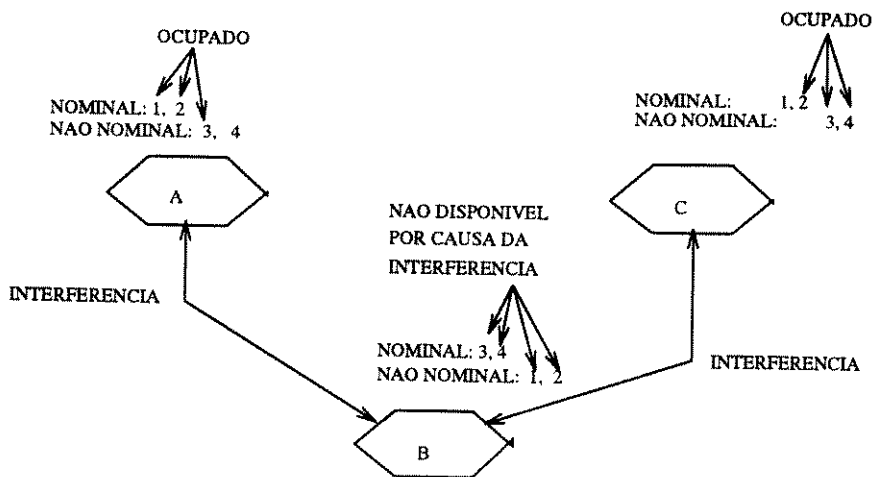


Figura 2.3: Estado do sistema antes da aplicação do segundo algoritmo.

c - Terceiro Algoritmo. Este algoritmo é uma extensão do segundo algoritmo. Continuando com o mesmo exemplo, suponha que as chamadas descritas anteriormente tenham sido efetuadas. A Figura 2.4 ilustra o estado do sistema.

Suponha que uma nova chamada seja originada na célula *C*. A chamada deverá ser alocada ao canal 4. Suponha que a chamada do canal 3 na célula *C* termine. A Figura 2.5 ilustra o estado do sistema.

Se uma nova chamada for originada na célula *B*, ela poderá ser atendida somente após rearranjos serem feitos nas chamadas em progresso: a chamada do canal 4 na

célula *C* será movida para o canal 3, ou a chamada do canal 3 na célula *A* será movida para o canal 4. Neste exemplo, por simetria, os dois candidatos terão a mesma probabilidade de bloqueio futura.

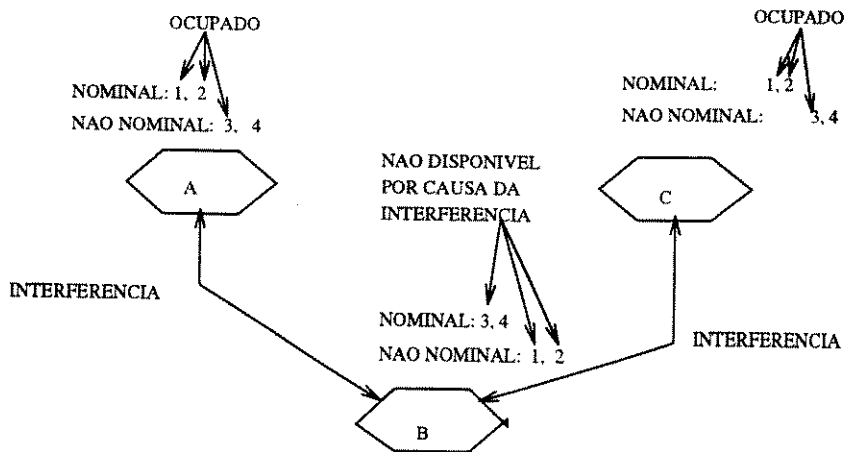


Figura 2.4: Estado do sistema após a aplicação do segundo algoritmo.

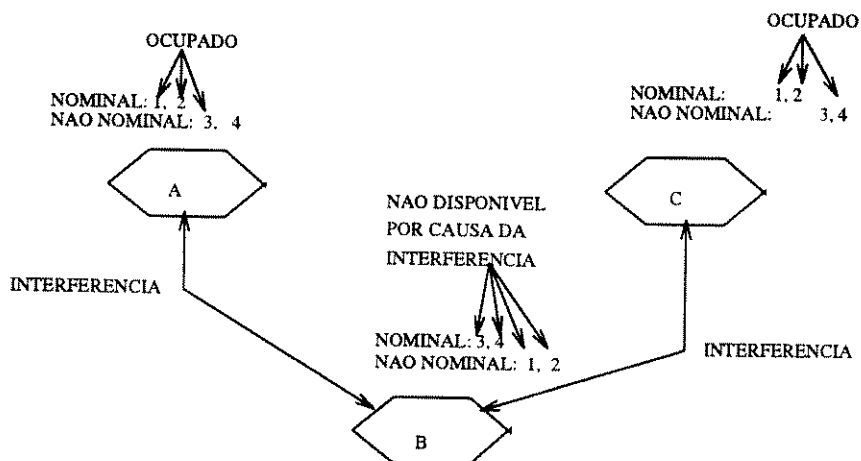


Figura 2.5: Estado do sistema antes da aplicação do terceiro algoritmo.

Se duas células forem adicionadas ao sistema, Figura 2.6¹, o sistema torna-se assimétrico. Se uma chamada é originada na célula *B*, o sistema pode ser rearranjado movendo a chamada do canal 2 para o canal 1 na célula *C* ou mudando a chamada

¹Na Figura 2.6 “NÃO DISPONÍVEL POR CAUSA DA INTERFERÊNCIA”, como mostrado na Figura 2.5, é suprimida por clareza.

do canal 1 para o canal 2 na célula A. A segunda alternativa é indesejável porque deixaria a célula Y com indisponibilidade de canais enquanto que na primeira alternativa isso não ocorre. No caso geral, haverá várias possibilidades de rearranjo e muitas células interferentes. A escolha, novamente, é feita de forma a se minimizar a máxima probabilidade de bloqueio futura.

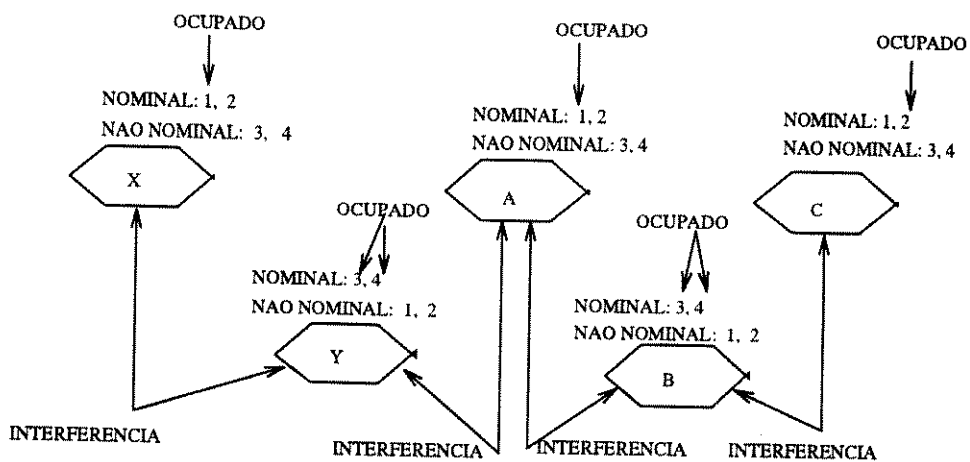


Figura 2.6: Estado de um sistema assimétrico antes da aplicação do terceiro algoritmo.

Anderson

Anderson [21] estudou 3 algoritmos de alocação de canais por empréstimo. A diferença entre eles está no critério da seleção do canal de empréstimo. Os algoritmos foram denominados de Algoritmos I, II e III. O Algoritmo I foi proposto num memorando, não tendo sido publicado. O Algoritmo II é uma versão melhorada do I e foi um trabalho conjunto de Engel e Peritsky [20]. O Algoritmo III foi proposto pelo próprio Anderson.

a - Algoritmo I. Este algoritmo considera o conceito de *canais nominais* descrito anteriormente. Quando há uma nova chamada e os *canais nominais* estão todos ocupados, é feita uma tentativa de empréstimo de canal de alguma célula adjacente. Se houver duas ou mais células adjacentes que tenham canais disponíveis para empréstimo, o

canal é escolhido daquela que possuir a maior quantidade de canais livres. Por exemplo, considere a célula *A*, onde todos os *canais nominais* estão ocupados (Figura 2.7). Canais que são candidatos ao empréstimo são os *canais nominais* de uma das três células adjacentes. Para o canal estar disponível para empréstimo é necessário que não esteja sendo utilizado por qualquer das células interferentes.

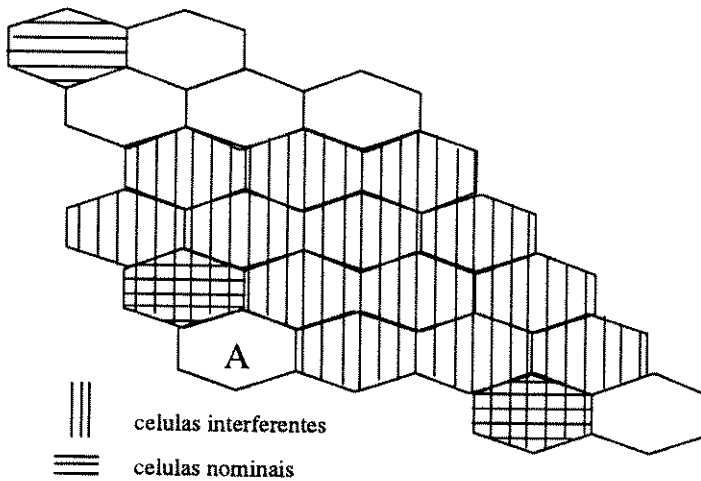


Figura 2.7: Ilustração para o Algoritmo I e II

b - Algoritmo II. Este é uma versão melhorada do Algoritmo *I*. Ele é também mais complexo. Alguns termos são definidos a seguir:

- *Canais nominais*: são os canais alocados para a célula quando da divisão de frequências no sistema (já definido anteriormente).
- *Células nominais*: são as células que possuem o mesmo conjunto de canais nominais.
- *Célula interferente*: qualquer célula que sofra interferência de uma dada célula é uma das suas células interferentes.

O canal de empréstimo é escolhido no sentido de se maximizar a disponibilidade de canais nominais da célula nominal em pior situação. Observe que o Algoritmo

I selecionava o canal de empréstimo baseado somente nos estados das células adjacentes. Esta situação está ilustrada na Figura 2.7, onde as três células nominais indicadas estão com uma distância de reuso de três células. Note que as células interferentes da célula *A*, onde há indisponibilidade de canais nominais, também estão indicadas. Como antes, candidatos para empréstimo são canais nominais das células adjacentes. Entretanto, como mostrado na Figura 2.7, o empréstimo pode afetar várias células nominais. O objetivo do Algoritmo *II* é levar isto em consideração na decisão da escolha do canal de empréstimo baseando-se na célula nominal de pior estado (canais nominais disponíveis) dentre todas as células nominais afetadas pelo empréstimo. O pior caso refere-se à célula nominal que terá a menor disponibilidade de canais nominais após o empréstimo.

c - Algoritmo III. Ao invés de se tentar otimizar o empréstimo, o Algoritmo *III* seleciona o primeiro canal disponível. A filosofia do canal nominal é também levemente modificada. Ao invés de se alocarem os canais diretamente para as células, os canais do sistema são divididos em subconjuntos de canais. Estes subconjuntos são alocados nominalmente para as células com distância de reuso de três células. Um exemplo da sequência de procura é mostrado na Figura 2.8.

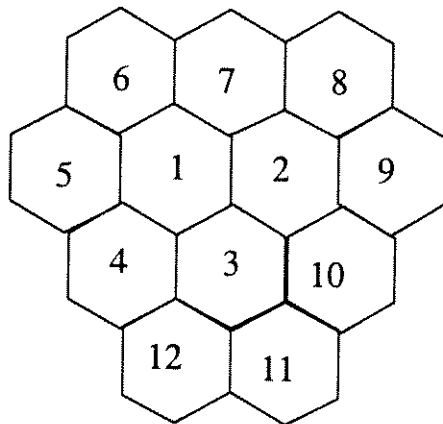


Figura 2.8: Sequência de procura

Se o subconjunto da célula *1* não possui canais disponíveis, o subconjunto associado

à célula 2 é procurado. Caso a procura seja mal sucedida o subconjunto associado à célula 3 é pesquisado, e assim por diante. Este processo continua até que um canal disponível seja encontrado, caso contrário a chamada é bloqueada.

Elnoubi, Singh e Gupta

Elnoubi, Singh e Gupta [22] propuseram uma nova estratégia de alocação de canais. O algoritmo permite o empréstimo quando todos os canais nominais estão ocupados, desde que não haja interferência co-canal. O canal emprestado não pode ser utilizado nas três co-células mais próximas, mas é possível fazer-se um rearranjo quando um canal nominal é liberado para alocar a chamada que está sendo servida por um canal emprestado. Com isso, o canal emprestado é liberado e as três co-células, que estavam impedidas de usar este canal em virtude da interferência co-canal, poderão utilizar o canal. Assim, o tráfego no canal de empréstimo é diminuído aumentando-se o desempenho do sistema.

Descrição do Algoritmo. Um grupo de canais é alocado inicialmente de acordo com a *alocação fixa de canais*. Assim cada célula possui uma *lista de canais nominais*. Quando da requisição de uma chamada o canal, se possível, deve ser um canal nominal. Caso contrário, um *empréstimo de canal* é feito de alguma célula vizinha para atender a chamada. Os *primeiros canais da lista nominal* são prioritários no atendimento das chamadas dentro da célula, enquanto que os *últimos canais da lista nominal* são utilizados preferencialmente para empréstimos para atender temporariamente as chamadas das células vizinhas.

Quando uma chamada ocorre na célula, o canal nominal de maior prioridade desta célula deverá ser alocado. Este teste é feito em ordem decrescente de prioridade. Se todos os canais nominais estão ocupados, um canal de empréstimo é alocado da célula adjacente com maior disponibilidade de canais. Um canal estará disponível para empréstimo se ele estiver livre na célula adjacente e nas duas co-células mais próximas, de modo a se evitar a interferência co-canal. Isto é mostrado na Figura 2.9, onde o canal x é emprestado da célula 2 para ser usado por uma chamada

na célula 1. Após o empréstimo, o canal x é impedido nestas três células, pois as distâncias são menores do que a distância mínima de reuso com relação à célula 1. Estando impedido, o canal x não pode ser utilizado para atender as chamadas nestas três células e nem pode ser emprestado para as células adjacentes.

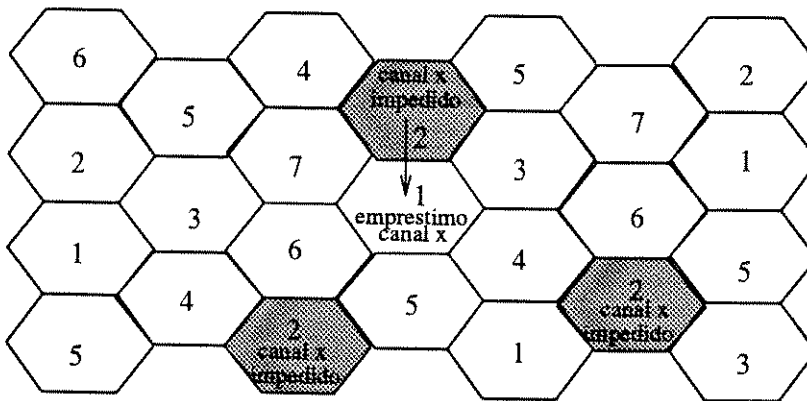
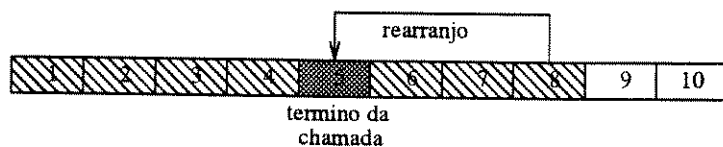


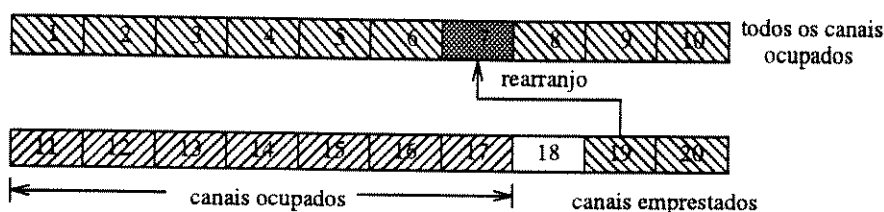
Figura 2.9: O canal x da célula adjacente 2 é emprestado à célula 1. O canal x é impedido nas três células interferentes hachuradas.

O canal de empréstimo não é escolhido apenas pela quantidade de canais disponíveis nas células adjacentes, mas também pela posição que ele ocupa na lista nominal de prioridade. Note que uma chamada atendida por canal de empréstimo impede o uso deste canal nas três co-células mais próximas. Estratégias de rearranjo são utilizadas para diminuir o tráfego dos canais de empréstimo. Quando uma chamada atendida por um canal de empréstimo termina, o canal é liberado do impedimento da célula adjacente que fez o empréstimo e das duas co-células mais próximas. Quando uma chamada atendida por um canal nominal termina e existe uma chamada em progresso sendo atendida por um canal de empréstimo dentro da mesma célula, a segunda chamada é rearranjada para o canal nominal e o canal de empréstimo é liberado (desimpedido) para uso nas três co-células. Da mesma forma, quando uma chamada atendida por um canal nominal termina e não há chamadas sendo servidas

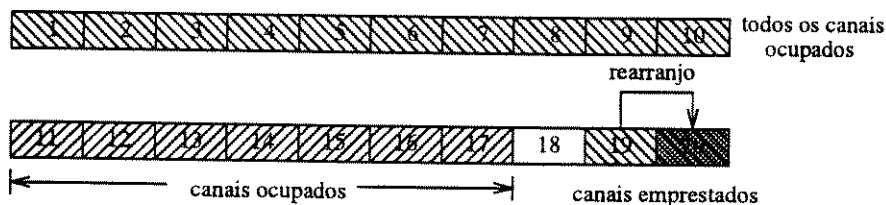
por canais de empréstimo nesta célula, a chamada atendida pelo canal nominal de maior prioridade é rearranjada para outro de menor prioridade. Isto mantém a prioridade dos primeiros canais da lista para atender as chamadas nominais. As estratégias mencionadas estão ilustradas nos exemplos seguintes.



(a) - Exemplo 1



(b) - Exemplo 2



(c) - Exemplo 3

Figura 2.10: Exemplos ilustrando as estratégias de rearranjo

Considere o caso de 10 canais nominais por célula. Canais de 1 a 10 são nominalmente alocados às células 1; canais de 11 a 20 às células 2; canais de 21 a 30 às células 3, ...; e canais de 61 a 70 às células 7.

- *Exemplo 1:* suponha que haja oito chamadas servidas pelos canais nominais 1, 2, ..., 8 na célula 1 e nenhum canal emprestado. Se a chamada atendida pelo canal 5 termina, a chamada atendida pelo canal 8 é rearranjada para o canal 5 e o canal 8 é liberado (vide Figura 2.10(a)).
- *Exemplo 2:* suponha que haja doze chamadas na célula 1 atendidas pelos canais

nominais 1, 2, ..., 10 e os canais 19 e 20 emprestados da célula 2. Se a chamada atendida pelo canal 7 termina, a chamada atendida pelo canal 19 é rearranjada para o canal 7 e o canal 19 é liberado para uso nas três co-células (vide Figura 2.10(b)).

- *Exemplo 3:* suponha que haja doze chamadas na célula 1 atendidas pelos canais nominais 1, 2, ..., 10 e os canais 19 e 20 emprestados da célula 2. Se a chamada atendida pelo canal 20 termina, a chamada atendida pelo canal 19 é rearranjada para o canal 20 e o canal 19 é liberado para uso nas três co-células (vide Figura 2.10(c)).

Zhang e Yum

Zhang e Yum [23] propuseram uma nova estratégia de alocação de canal chamada *BDCL* (*Borrowing with Directional Channel Locking*). Nesta técnica o canal está disponível para empréstimo mesmo que esteja impedido nas três co-células mais próximas. O algoritmo é descrito com detalhes a seguir.

a - Motivação. Na estratégia do *Elnoubi, Singh, e Gupta* [22], o canal estará disponível para empréstimo somente se ele estiver *simultaneamente* livre nas três co-células mais próximas. Esta condição é muito restritiva como veremos nos dois exemplos a seguir.

- *Exemplo 1:* suponha que a célula *P* tenha o canal *x* emprestado da célula *A1* conforme a Figura 2.11. Com isso o canal *x* é impedido nas células *A1*, *A2*, e *A3* de acordo com a estratégia de *Elnoubi*. Portanto a célula *Q*, célula adjacente de *A3*, não poderá ter o canal *x* emprestado de *A3*. Entretanto, desde que *P* e *Q* estejam separadas de três células (distância mínima de reuso), *Q* poderia usar o canal *x* sem interferir na chamada da célula *P*.
- *Exemplo 2:* suponha que o canal *x* esteja impedido em *A1*, *A2*, e *A3* devido ao empréstimo do canal *x* de *A1* para *P*. Então *R* não pode ter o empréstimo do canal *x* da célula *A4* porque o canal precisa estar livre simultaneamente

em A4, A3, e A2. Entretanto, desde que R e P estejam distantes entre si de três células, R poderia ter o empréstimo do canal x de A4 sem interferir na chamada em P .

As observações acima motivaram os autores [23] a proporem uma nova estratégia de alocação de canal denominada *borrowing with directional channel locking (BDCL)*. Nesta estratégia quando um canal é emprestado, o impedimento destes nas co-células é restrito somente naquelas afetadas por este empréstimo. Assim, o número de canais disponíveis para empréstimo é maior do que aquele do algoritmo do Elnoubi [22]. Para se determinarem os casos em que um canal “impedido” pode ser emprestado, “direções de impedimento” são especificados para cada canal impedido.

b - Impedimento Direcional do Canal Emprestado. Suponha que A1 empreste o canal x para P , conforme a Figura 2.11.

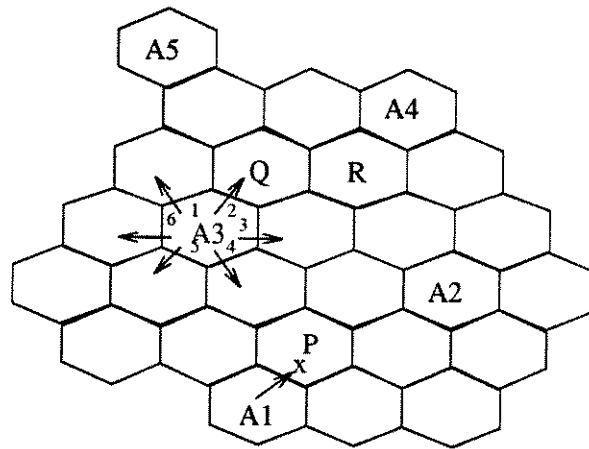


Figura 2.11: Empréstimo de canal e impedimento direcional

Então o canal x em A3 precisa ser impedido somente nas direções 3, 4, e 5. Células nas direções 1, 2, e 6 estão livres para empréstimo do canal x pois o empréstimo não interfere na chamada em P . Como Q está na direção 2 de A3, o canal x não está impedido para Q . O empréstimo do canal x para Q dependerá da condição de impedimento de A4 e A5 (as duas co-células mais próximas). Se o canal x estiver

impedido em A4 e A5, mas a célula causadora deste impedimento estiver fora da área de interferência de Q, o canal x poderá ser emprestado para Q.

c - Rearranjo de canal. Para minimizar o empréstimo de canal, os conceitos de *ordenamento* e *rearranjo de canais* são adotados na estratégia BDCL. Ao término de uma chamada, um canal é rearranjado de acordo com as seguintes regras:

1. Quando uma chamada atendida por um canal nominal termina e há uma chamada servida por um canal nominal de maior ordem dentro da célula, a chamada associada ao canal nominal de maior ordem é *rearranjada* para o canal nominal de menor ordem que foi liberado, conforme a Figura 2.12(a).
2. Quando uma chamada atendida por um canal nominal termina e há uma chamada sendo servida por um canal de empréstimo, ela é *rearranjada* para o canal nominal. Assim, o canal de empréstimo é liberado, conforme a Figura 2.12(b).
3. Quando uma chamada atendida por um canal de empréstimo termina e há outra chamada servida por um canal de empréstimo de menor ordem, ela é *rearranjada* para o canal de empréstimo de maior ordem conforme a Figura 2.12(c).
4. Quando um canal é *completamente desimpedido* (nas seis direções) pelo término de chamada(s) na célula interferente, qualquer chamada atendida por um canal de empréstimo ou por um canal nominal de maior ordem é *rearranjada* para este canal, conforme a Figura 2.12(d).

A estratégia de rearranjo de canal pode minimizar o número de chamadas em progresso nos canais de empréstimo. A regra 4 é importante porque empréstimos de canais ocorrem onde o nível de tráfego é intenso. Na Figura 2.11, se a célula P recebe um canal emprestado da célula A1, é possível que ocorra uma chamada em A1 no momento seguinte e não haja canal disponível para atender a chamada. Assim, A1 recorrerá a um empréstimo nas células adjacentes. Se a maioria das células

está com alto tráfego ao mesmo tempo, o empréstimo de um canal pode induzir um *múltiplo empréstimo de canal*. Em razão da penalidade do impedimento do canal quando do empréstimo, o grau de serviço do sistema deverá degradar. A regra 4 é uma forma de reduzir a quantidade de múltiplos empréstimos.

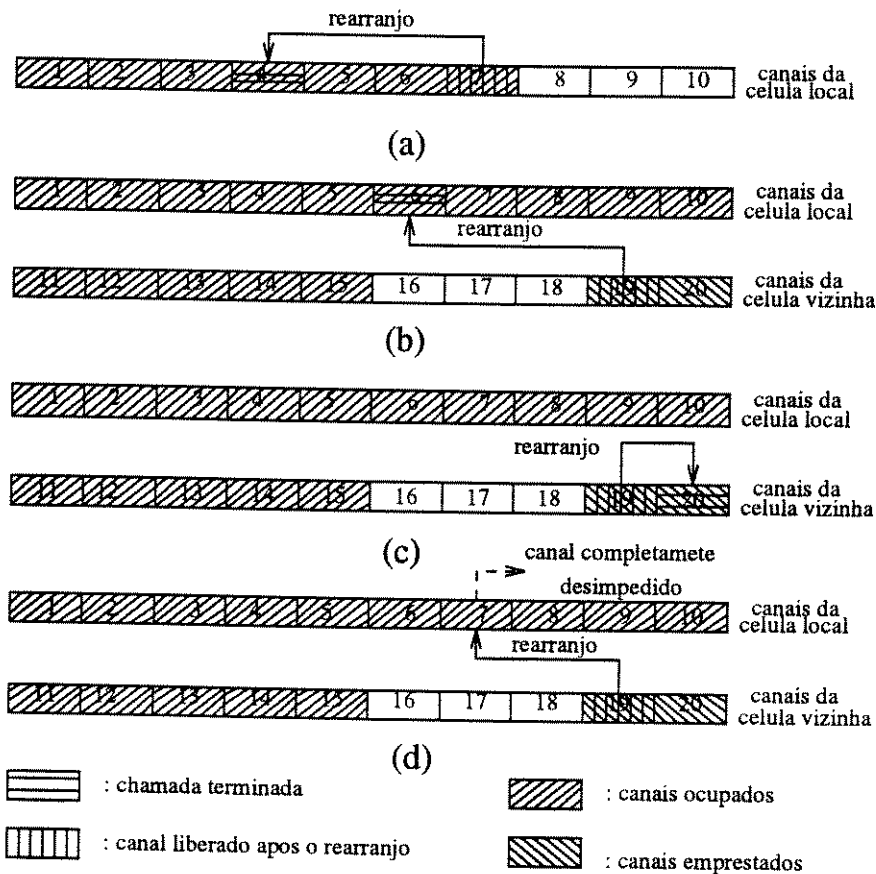


Figura 2.12: Rearranjo de canal

Xu e Mirchandani

Xu e Mirchandani [24] propuseram o VFCA (*Virtually Fixed Channel Assignment*). No VFCA os canais são nominalmente alocados como na alocação fixa convencional, mas as células estão livres para emprestarem canais umas às outras. O algoritmo e o modelo são descritos em detalhe a seguir.

a - Empréstimo e Rearranjo. Quando uma tentativa de chamada é originada em uma célula c_k onde todos os canais nominais estão ocupados, c_k poderá receber um canal de empréstimo i de alguma célula adjacente contanto que a distância de reuso seja satisfeita. Para prevenir a interferência co-canal durante o empréstimo, o canal i deve ser *impedido* nas células vizinhas que o tenham como canal nominal. Se a restrição de uso de *canais adjacentes*² é considerada, então canal(is) adjacente(s) deve(m) também ser impedido(s) em alguma(s) célula(s) adjacente(s). Considera-se que um canal impedido não possa ser emprestado.

Assim, em geral, quando c_k está com canal de empréstimo, algum canal livre dentro da distância de reuso deve ser impedido³ até que o canal de empréstimo esteja livre. Denominaremos um canal de empréstimo como $f_{il} \rightarrow c_k$ se o canal i da célula c_l é emprestado para c_k . Denominaremos o resultado do impedimento das portadoras como *interferência de portadoras* e as suas células como *células interferentes*, com respeito a $f_{il} \rightarrow c_k$. Como exemplo, considere o sistema celular com padrão de reuso de 7 células ilustrado na Figura 2.13. O número na parte superior indica o grupo de canais alocados para cada célula e na parte inferior informa o número da célula.

Suponha que a célula c_4 esteja com todos os canais ocupados, e uma nova chamada seja originada em c_4 . Para satisfazer a chamada, c_4 considera a hipótese do empréstimo do canal i de c_1 . Então, para fazer $f_{i1} \rightarrow c_4$ livre de interferência co-canal, f_{i1} , f_{i6} e f_{i9} devem estar livres quando $f_{i1} \rightarrow c_4$ é iniciado, e devem permanecer impedidos até que $f_{i1} \rightarrow c_4$ termine (vide Figura 2.13). As portadoras f_{i1} , f_{i6} , e f_{i9} são interferentes e as células c_1 , c_6 , c_9 (células hachuradas na Figura 2.13) são interferentes, com respeito a $f_{i1} \rightarrow c_4$.

Se não houver um canal i tal que $f_{im} \rightarrow c_k$ para toda célula adjacente m de c_k então, em geral, a chamada é rejeitada. Entretanto, em algumas situações, podemos rearranjar canais para que $f_{im} \rightarrow c_k$ seja factível. Por exemplo, suponha que f_{i1} e

²Quando da divisão de canais, evita-se a alocação de canais adjacentes em células vizinhas.

³Quando a portadora f_{il} está impedida, significa que o canal i está impedido na célula l .

f_{i6} estejam livres e f_{i9} ocupado. Então devemos rearranjar a chamada atendida por f_{i9} para f_{j9} para algum $j \neq i$, contanto que f_{j9} esteja livre, tal que f_{i9} seja liberado e, conseqüentemente, $f_{i1} \rightarrow c_4$ torna-se possível.

Esta estratégia aumenta a factibilidade de empréstimo ao mesmo tempo que mantém um mínimo de rearranjo de canais.

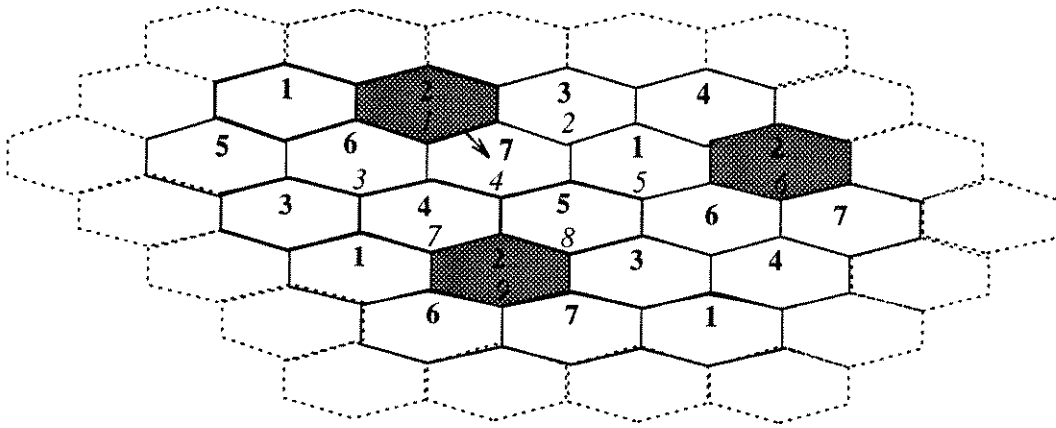


Figura 2.13: Uma chamada origina-se em c_4 onde não há canais nominais livres. Supondo que f_{i1} é emprestado para c_4 , então f_{i1} , f_{i6} e f_{i9} estão impedidos.

b - Retorno Imediato do Canal. A estratégia do retorno do canal de empréstimo é também importante em VFCA. Anderson [21] descreveu duas estratégias de retorno. Na *estratégia do retorno natural* o canal de empréstimo retorna somente após o término da chamada. Por outro lado, na *estratégia do retorno imediato*, o canal de empréstimo retorna tão logo ocorra uma liberação do canal nominal da célula que pediu o empréstimo, através do rearranjo do canal de empréstimo para o nominal, ou quando a chamada termina no canal de empréstimo. No exemplo da Figura 2.13, para a estratégia do retorno imediato, o canal i retorna para c_1 quando um canal nominal em c_4 é liberado ou quando a chamada termina. Quando há um retorno do canal de empréstimo, o conjunto de portadoras interferentes associado ao canal é desimpedido.

Jiang e Rappaport

Jiang e Rappaport [25] propuseram o *CBWL* (*Channel Borrowing Without Locking*). Canais de empréstimo são utilizados com potência de transmissão reduzida para limitar a interferência co-canal. Com isto, não há a necessidade de impedimento do canal emprestado. O algoritmo é descrito em detalhe a seguir.

a - Esquema do CBWL. Suponha que, por conveniência, o sistema esteja subdividido em células hexagonais com antenas omnidirecionais nas estações bases. Como na alocação fixa, o sistema assinala C canais para cada célula.

Se todos os canais da célula estão ocupados e uma nova chamada ocorre, o empréstimo de canal é utilizado. O empréstimo do canal pode ser feito somente pelas células adjacentes. O canal emprestado não pode ser usado pela célula responsável pelo empréstimo, mas pode ainda ser utilizado por quaisquer das co-células mais próximas. Assim, não há impedimento de canal. Com o objetivo de evitar o aumento da interferência co-canal, a potência de transmissão dos canais emprestados é reduzida. Portanto, eles podem ser acessados somente em uma parte da célula que pede o empréstimo. Para determinar se uma estação móvel está na região que pode ser atendida por um canal de empréstimo, cada célula transmite um sinal cuja potência (reduzida) é a mesma da potência do canal de empréstimo. O sinal é denominado *borrowed channel sensing signal* (*BCSS*). Se o *BCSS* não estiver acima de um limiar na estação móvel, o empréstimo de canal não pode ser usado pela estação móvel.

Células vizinhas são identificadas da seguinte maneira. Com respeito a uma dada célula, escolhe-se a primeira célula adjacente. A posição da célula adjacente pode ser arbitrária mas uma vez escolhida, todas as outras terão o mesmo comportamento descrito a seguir. As outras cinco células adjacentes restantes são numeradas sequencialmente no sentido horário a partir da primeira. A célula em questão é denominada como *célula 0*. Os C canais da célula são divididos em sete grupos distintos. Cada grupo possui C_i ($i = 0, 1, \dots, 6$) canais. Os canais do grupo 0 são reservados para uso exclusivo da dada célula. Nos seis grupos restantes, os canais

podem ser emprestados para as células adjacentes. A i -ésima célula adjacente só pode ter o empréstimo do i -ésimo grupo. Por conveniência, consideramos um arranjo simétrico com $C_1 = C_2 = \dots = C_6 = l$. Um exemplo da estrutura do canal do CBWL é mostrado na Figura 2.14.

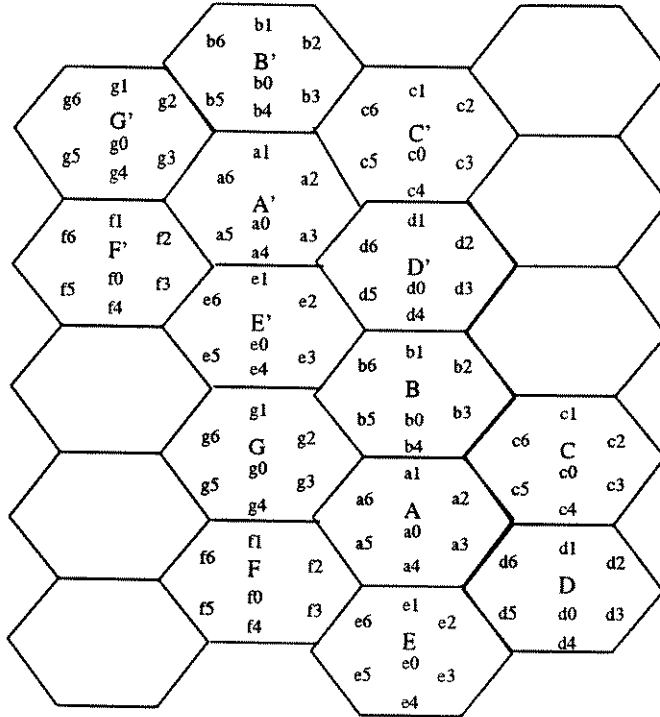


Figura 2.14: Estrutura do canal do CBWL ($N=7$).

O CBWL, com a estrutura descrita acima, possui três vantagens.

- No esquema, uma célula não necessita transmitir e receber todos os canais das suas células vizinhas (7 C canais). Basta acessar somente os seus canais e os seis grupos, um grupo de canal para cada célula adjacente ($C+6l$ canais, neste exemplo). Com isto, a complexidade do algoritmo é reduzida.
- Sem o esquema, o empréstimo poderia ser feito por qualquer canal livre das células adjacentes. Na Figura 2.14, o símbolo “ ’ ” identifica co-células. Suponha

que B e E' tenham o mesmo canal de empréstimo, x , respectivamente de A e A' . Assim, a potência do canal x é significativamente reduzida para evitar um excesso na interferência co-canal. Uma alternativa seria emprestar o canal x para apenas uma das células, B ou E' . Isto implicaria na necessidade de toda célula conhecer o uso do canal nos *clusters* mais próximos. Deste modo, o gerenciamento de canais seria bem mais complexo. Note, no entanto, que o grupo de canais a_1 pode ser emprestado somente para B ou B' , o grupo de canais a_2 pode ser emprestado somente para C ou C' , e assim por diante. Portanto, a própria estrutura impede os conflitos de empréstimo e excesso de interferência co-canal.

- Nos atuais sistemas celulares, por causa das características dos filtros utilizados nas estações móveis, canais adjacentes não são utilizados na mesma célula. Com uma organização cuidadosa, o esquema pode assegurar que *canais adjacentes* não sejam utilizados na mesma célula mesmo no empréstimo.

b - Troca de Canais. Sem a troca de canais, quando uma determinada célula recebe um pedido de empréstimo de alguma célula adjacente, o pedido será rejeitado se todos os canais que pertencem ao grupo associado à célula requisitante estiverem ocupados. Com a troca de canais, se um canal desse grupo estiver sendo usado por uma chamada na própria célula e se houver um canal livre em outro grupo, a chamada será comutada para aquele grupo. Isto liberará um canal do grupo cheio, e o canal liberado pode ser emprestado para a célula requisitante.

c - Rearranjo de Canais. Devido à menor potência de transmissão dos canais de empréstimo, somente os assinantes cuja perda de propagação em relação à estação rádio base não exceder a um limite poderão usar um canal emprestado. Chamaremos os assinantes que estão na região onde os canais podem ser emprestados como assinantes do *tipo A* (aqueles onde o *BCSS* está acima do limite) e os outros assinantes como os do *tipo B* (aqueles onde o *BCSS* não é suficientemente forte). Rearranjo de canais pode ser utilizado para beneficiar os assinantes do *tipo B*. Com o rearranjo,

se uma nova chamada do tipo *B* ocorre e encontra todos os canais da sua célula ocupados, a chamada ainda não será necessariamente bloqueada. Se ao mesmo tempo uma chamada do tipo *A* usa um canal regular e no mínimo existir uma célula adjacente que pode emprestar um canal, a chamada do tipo *A* pode usar o canal de empréstimo da célula adjacente liberando o canal regular para a chamada do tipo *B*.

2.2.3 Alocação Dinâmica de Canais

Esta técnica compreende um número de estratégias com a característica comum em que todos os canais do sistema ficam 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 [26].

Cox e Reudink: Parte I

Cox e Reudink [26] publicaram pioneiramente um estudo sobre o desempenho de cinco técnicas de alocação de canais, quatro dinâmicas e uma fixa, através de simulação.

a - Configuração. O estudo inicial foi realizado em uma dimensão, ao longo de uma linha, conforme a Figura 2.15.

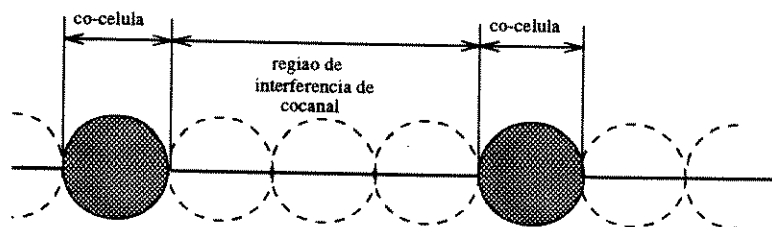


Figura 2.15: Ilustração do reuso de canal.

Os resultados em uma dimensão não se aplicam diretamente a sistemas bi-dimensionais. Note que esta configuração é aplicável a sistemas unidimensionais como as rodovias. O movimento dos assinantes é limitado ao longo da linha. A distância mínima de reuso de canal é de *quatro* células sem que haja interferência co-canal. Além disso, a chamada é atendida somente por uma estação base.

b - Estratégias. Suponha que o estado do canal nas estações base seja armazenado numa matriz bi-dimensional $M(i,k)$, onde i representa o número do canal e k a estação base. A Tabela 2.1 ilustra um exemplo desta matriz.

número do canal	estação base																	
	1	2	...	k-7	k-6	k-5	k-4	k-3	k-2	k-1	k	k+1	k+2	k+3	k+4	k+5	k+6	k+7
1							x				x					x		
2									x						x			
⋮																		
i				x													x	
i+1				x											x			
i+2						x												x
i+3						x										x		

Tabela 2.1: Matriz de estado do canal. O símbolo x indica canal em uso na estação base. No exemplo, k é a estação base de referência.

A busca do canal acontece na ocorrência de novas chamadas. Canais são procurados em seqüência a partir do canal 1. Se em um ponto da pesquisa houver um canal livre (não usado pelas células interferentes), este é alocado imediatamente para atender a chamada. O primeiro teste na procura do canal é verificar se ele está em uso na própria célula. Se o canal não estiver em uso, um novo teste é feito para verificar se o canal não está sendo utilizado nas células onde a distância é menor do que a distância mínima de reuso D . Por exemplo, na estação base k da

Tabela 2.1 nem o canal 1 nem o canal 2 pode ser empregado por causa dos critérios mencionados acima. Esses critérios devem ser satisfeitos para que o canal esteja disponível para atender uma chamada, e os critérios são válidos para qualquer estratégia. A chamada será bloqueada quando não houver canal disponível. Se houver mais de um canal disponível para atender uma chamada, então uma seleção deve ser realizada baseado em alguns pontos pré-estabelecidos. As estratégias discutidas a seguir consideram que qualquer canal alocado para o sistema está disponível para uso em qualquer estação base.

- *First Available (FA)*: talvez a estratégia mais simples e menos onerosa seja a FA, onde o primeiro canal encontrado é alocado para atender a chamada. Embora possa parecer que a estratégia não seja otimizada, os resultados obtidos na simulação pelos autores [26] indicam um bom desempenho comparativamente aos algoritmos mais complexos considerados.
- *Mean Square (MSQ)*: a atividade do canal é verificada nas estações base em intervalos de uma a duas distâncias mínimas de reuso (entre D a $2D$). Observe que o uso do canal em distâncias maiores do que $2D$ permite o seu reuso em outra estação base. O MSQ minimiza a quantidade

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j^2, \quad D \leq D_j < 2D.$$

Para os canais disponíveis, D_j é a distância entre a estação base procurando o canal e as estações utilizando o canal no intervalo especificado, e n é o número de estações base. Se $n = 0$ para alguns canais, isto é, o canal não estiver sendo utilizado por qualquer estação base entre D e $2D$ nas duas direções, então o primeiro canal encontrado é alocado para a chamada. Na Tabela 2.1 a estratégia MSQ poderia escolher o canal $i+3$ para atender uma nova chamada na estação k .

- *Nearest Neighbor (NN)*: esta estratégia escolhe o canal em uso na estação base mais próxima, desde que a distância não seja menor do que D . Portanto, isto

minimiza D_{min} sobre os canais disponíveis, onde D_{min} é a distância da primeira estação base que emprega o canal. Se houver mais de um canal com o mesmo D_{min} , então o primeiro canal encontrado é alocado para atender a chamada. Na Tabela 2.1 a estratégia *NN* poderia escolher o canal $i+1$ para atender uma nova chamada na estação k .

- *Nearest Neighbor + 1 (NN + 1)*: esta estratégia é similar ao *NN*, exceto que ele procura o D_{min} para os canais disponíveis tal que

$$D_{min} \geq D + 1.$$

Se não existir um canal que satisfaça tal condição, então um canal com $D_{min} = D$ é alocado. Esta estratégia permite que um maior número de assinantes mantenha o mesmo canal quando estes assinantes cruzam a fronteira (*handoff*). Na Tabela 2.1 a estratégia *NN + 1* poderia escolher o canal $i+2$ para atender uma nova chamada da estação k .

Cox e Reudink: Parte II

Cox e Reudink [27] publicaram os resultados da alocação dinâmica com rearranjo utilizando simulação, comutando os canais alocados para algumas das chamadas em progresso para tentar manter a mínima distância de reuso entre células usando o mesmo canal. O modelo e o algoritmo são descritos em detalhes a seguir.

a - Modelo. Suponha que o sistema seja formado por áreas de cobertura de formato quadrangular, e não existam regiões comuns nas fronteiras conforme a Figura 2.16.

Os grupos de canais de A a P na Figura 2.16 estão indicados na Figura 2.17. Na Figura 2.17 os canais são numerados de 1 a T , onde T é o número total de canais no sistema. No exemplo da Figura 2.17 os canais podem ser usados simultaneamente desde que estejam separados de quatro células. Isto é, o fator de reuso é quatro.

Alguns dos canais disponíveis do sistema estão alocados de forma fixa. Isto é, certos canais só podem ser usados em determinadas células. F representa o número

de canais fixos alocados para cada célula (F pode variar de 0 a T dividido pelo intervalo de reuso ao quadrado, onde o reuso é quatro). Os canais restantes, $[T - (reuso)^2 \times F]$, estão disponíveis para qualquer célula desde que estejam separados da distância mínima de reuso.

Y \ X								
	1	2	3	4	5	6	.	.
1	A	B	C	D	A	B	C	.
2	E	F	G	H	E	F	G	.
3	I	J	K	L	I	J	.	
4	M	N	O	P	M	N	.	
5	A	B	C	D	A	B	.	
.	E	F	.	.	.	.	.	
.	.	.						

Figura 2.16: Área de cobertura.

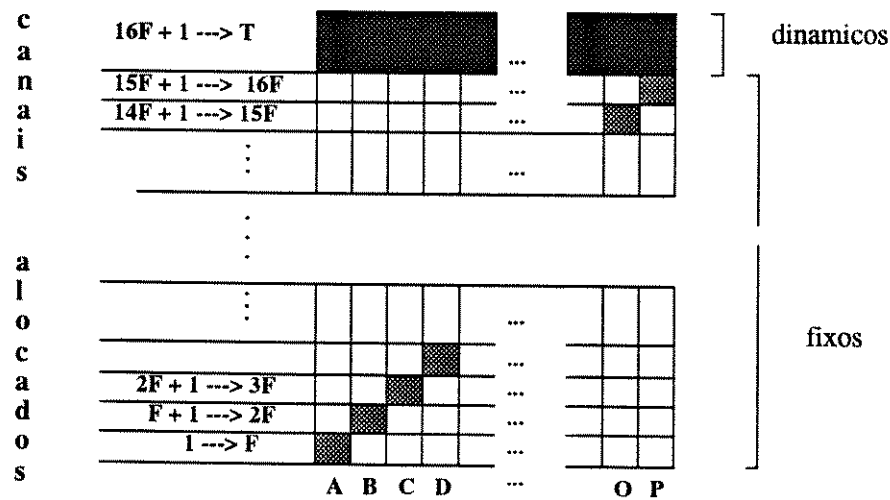


Figura 2.17: Alocação de canais para áreas de cobertura.

b - Algoritmo. Para atender a uma nova chamada, uma pesquisa é feita nos canais fixos da célula. Se houver um canal fixo disponível, ele será alocado para atender

a chamada. No caso de todos os canais fixos estarem ocupados, uma busca é feita nos canais dinâmicos. Se nenhum deles estiver livre, a chamada é bloqueada.

O eficiente uso de canais exige alocações simultâneas (reuso) de canais nas células, tão próximas quanto possível sem que a interferência co-canal seja excessiva. O rearranjo do canal dinâmico é iniciado quando uma chamada libera um canal fixo. Na liberação de um canal fixo, uma procura é feita para verificar se há alguma chamada atendida por canal dinâmico. Caso haja, um rearranjo do canal dinâmico para o canal fixo liberado anteriormente é feito para atender a chamada em progresso.

Prabhu e Rappaport

Prabhu e Rappaport [28] publicaram um estudo de dois métodos aproximados para análise de um sistema celular com alocação dinâmica. Estes métodos são analisados em termos do *tráfego cursado e não em função dos estados do sistema*. Os dois métodos apresentaram um grau de dificuldade menor do que os métodos disponíveis da época. Estes métodos aplicam-se somente a casos *uni-dimensionais* e com apenas uma frequência. Um detalhamento maior pode ser encontrado no Apêndice A.

Sengoku, Itoh, e Matsumoto

Sengoku, Itoh, e Matsumoto [29] publicaram um estudo da capacidade de tráfego através da teoria de grafos. O desempenho do sistema foi obtido através de simulações em um sistema com 37 células considerando os casos sem handoff e com handoff. Um detalhamento maior pode ser encontrado no Apêndice B.

Raymond

Raymond [30] publicou um estudo de um sistema celular simples. Algumas técnicas de alocação dinâmica de canais foram analisadas. Foi calculado o desempenho ótimo de um sistema simples com alocação dinâmica e os limites superiores do desempenho ótimo foram apresentados. Um detalhamento maior pode ser encontrado no Apêndice C.

Nakano, Yokono, Sengoku, Yamaguchi, Shinoda, Motooka, e Abe

Nakano e outros [31] propuseram uma aplicação da alocação dinâmica em uma parte da área de serviço enquanto a alocação fixa é aplicada para o restante do sistema.

A alocação dinâmica, quando aplicada adequadamente, pode proporcionar um desempenho de tráfego melhor do que o da fixa. Por outro lado, o uso do algoritmo dinâmico obriga a que as células sejam equipadas com todos os canais aumentando os custos. O uso de alocação dinâmica em apenas uma parte das células contribui para que o número de equipamentos diminua e, em consequência, diminua também o custo do sistema. Além disso, o volume de tráfego que a Central de Controle e Comutação (CCC) deve manipular, decresce.

Defina *região dinâmica* como a parte do sistema onde se utiliza a alocação dinâmica, e *região fixa* a parte do sistema onde a alocação fixa é empregada. Relativamente à região fixa, um conjunto de n_f canais é alocado a cada célula desta região. Na aplicação do algoritmo, considere as seguintes condições:

1. A alocação de canais na região dinâmica não deverá afetar a região fixa.
2. Na região dinâmica, somente os canais alocados à região fixa podem ser utilizados.

Se a alocação de canais na região dinâmica é feita de acordo com as condições mencionadas, o controle dos canais da região fixa ficará a cargo da própria célula, sem se levar em conta o estado dos canais da região dinâmica. Assim, a alocação dos canais da região fixa é exatamente a mesma de uma alocação fixa normal. Portanto, a simplicidade da alocação fixa permanece. Por outro lado para se evitar interferência dos canais da região dinâmica naquela da região fixa, o uso de alguns canais deverá ser evitado em algumas células da região dinâmica.

Como exemplo considere a Figura 2.18. As células da região dinâmica estão hachuradas, e as células da região fixa estão com seu conjunto de canais assinalados (A , B , e C). A distância de reuso é de uma célula. Seja Z_D o conjunto de células da região dinâmica, e Z_F o conjunto de células da região fixa. Na Figura 2.18, $Z_D = \{z_1, \dots, z_9\}$

e $Z_F = \{z_{10}, \dots, z_{19}\}$. Ainda na Figura 2.18, as células z_6, z_7, z_8, z_9 não possuem células interferentes na região fixa. Assim os conjuntos de canais A , B , e C podem ser usados nas células $z_6, \dots, z_9$. Porém os conjuntos B e C não podem ser usados em z_2 e z_4 porque B e C são empregados pelas células interferentes em Z_F . Se B e C fossem utilizados em z_2 e z_4 o controle da alocação de canais em z_{10}, z_{12}, z_{16} , e z_{19} seria mais complexo. Analogamente, A e C não podem ser usados em z_3 , e B não pode ser utilizado em z_1 e z_5 . Portanto, o uso de canais sofre limitações na região dinâmica. O número máximo de canais que podem ser alocados para cada célula não é constante na região dinâmica. Células z_2, z_3 , e z_4 podem usar somente um conjunto de canal. Seja Z_{D_r} um conjunto de células onde um conjunto de r canais pode ser utilizado, com $Z_{D_r} \subseteq Z_D$. Na Figura 2.18, $Z_{D1} = \{z_2, z_3, z_4\}$, $Z_{D2} = \{z_1, z_5\}$ e $Z_{D3} = \{z_6, z_7, z_8, z_9\}$. Se houver uma proibição do uso de alguns canais em algumas células pertencentes a Z_D , a alocação de canal na região dinâmica pode ser controlada sem considerações do estado do canal na região fixa.

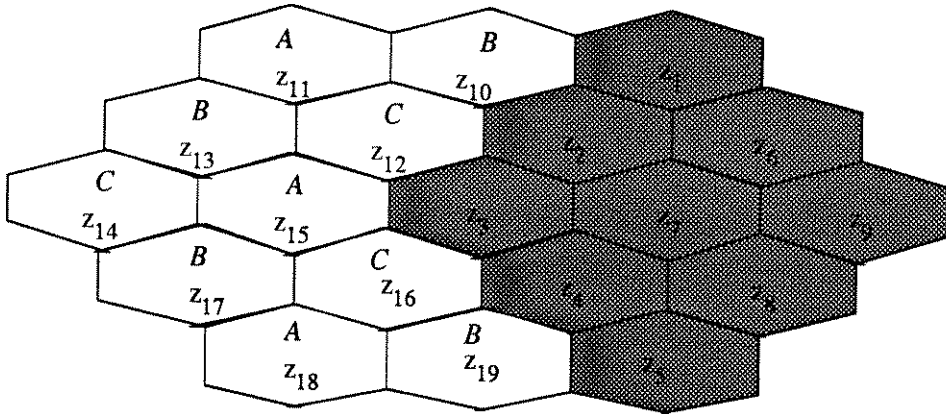


Figura 2.18: Região dinâmica e fixa. A área hachurada é a região dinâmica.

Note que o maior problema na região dinâmica é a alocação de canais nas células Z_{D1} . Entretanto, espera-se que o desempenho das células em Z_{D1} seja quase o mesmo de uma fixa porque uma célula em Z_{D1} e outra em Z_F possuem o mesmo número n_f de canais. Assim, a aplicação do *rearranjo* é uma opção para melhorar o desempenho.

Se uma parte de um determinado conjunto de canal, que pode ser usado em uma célula $z \in Z_D$ é alocada em uma célula $y \in Z_D$ interferente de z , e z possui poucos canais, então é feito um rearranjo nos canais usados por y a fim de liberar canais para z .

Nakano, Sengoku, Takahashi, Yamaguchi, Shinoda, e Abe

Nakano e outros [32] propuseram uma estratégia de rearranjo para alocação dinâmica considerando não somente como rearrumar os canais, mas também quais canais poderiam ser rearranjados e alocados a uma nova chamada. O trabalho teve como base os trabalhos de Sengoku, Itoh, e Matsumoto [29] e Sengoku, Kurata, e Tajima [33]

a - Alocação Dinâmica de Canal em Sistemas Celulares O sistema é dito do tipo *k-belt buffering* se as células interferentes estiverem distantes no máximo de k células da célula alvo. Se as células u e v são interferentes, o mesmo canal não pode ser alocado em ambas as células ao mesmo tempo. Seja S o conjunto de todas as células na área de serviço, e $B(v)$ o conjunto das células interferentes da célula v . $B(v)$ não inclui v .

Na Alocação Dinâmica de Canais (*ADC*) a alocação de canal na área de serviço varia com o estado das chamadas. Assim, a alocação de canal a uma nova chamada deve ser decidida no instante da ocorrência da chamada. Em geral, a questão da alocação de canais a novas chamadas em um sistema celular se assemelha ao problema da coloração na teoria de grafo. A solução deste problema é complicado de se obter em um curto espaço de tempo. Assim, algoritmos aproximados são necessários.

1. *Métodos Aproximados.* Considere que a origem das chamadas seja aleatória e que a probabilidade de surgirem duas ou mais chamadas ao mesmo tempo é desprezível em relação à probabilidade de surgir uma ou nenhuma chamada. Então, os algoritmos manipulam apenas um canal por vez.

Seja $v_a \in S$ a célula onde ocorre uma nova chamada e U_i o conjunto de células que estão usando o canal i . Em *ADC*, antes de se alocar o canal i a uma nova chamada em v_a é necessário verificar se $v_a \notin U_i$ e $B(v_a) \cap U_i = \emptyset$. Uma nova

chamada é bloqueada se $v_a \in U_i$ ou $B(v_a) \cap U_i \neq \emptyset$ para todo i . A complexidade computacional para se encontrar um canal disponível em v_a é proporcional a Nn_c , onde

$$N = \max_{v \in S} |B(v)| \quad (2.1)$$

e n_c é o número de canais.

No método *First Available (FA)* [26], os canais são numerados e alocados de forma ordenada. O método *FA* pode ser implementado apenas pela pesquisa dos canais utilizados em v_a e $B(v_a)$. *FA* é o método mais simples da *ADC*.

No método *Anel* [26] e *1-Clique* [29], as pesquisas dos canais em uso devem ser feitas em outras células além de v_a e $B(v_a)$. No método *1-Clique*

$$X_i(v_a) = \left\{ \bigcup_{\substack{v_j \in U_i \\ v_j \notin B(v_a) \\ v_j \neq v_a}} B(v_j) \right\} \cap B(v_a) \quad (2.2)$$

é obtido para todo i , onde i é o número do canal. O conjunto $X_i(v_a)$ fornece as células interferentes de v_a onde o canal i está impedido, portanto a alocação do canal i em v_a não afeta o número de canais disponíveis das células interferentes de v_a em $X_i(v_a)$. Assim, um canal é escolhido em ordem decrescente de $|X_i(v_a)|$ [29] para minimizar o impedimento do canal i em $B(v_a)$. O valor máximo de $|X_i(v_a)|$ é $|B(v_a)|$. Seja $K_i(v_a)$ o conjunto das células interferentes de v_a onde o canal i será impedido ao alocar o canal i em v_a

$$K_i(v_a) = B(v_a) - X_i(v_a). \quad (2.3)$$

Alocando-se o canal i em v_a diminui-se o número de canais disponíveis das células em $K_i(v_a)$ e o número de canais disponíveis das células em $X_i(v_a)$ permanece inalterado. Quanto maior $X_i(v_a)$, menor $K_i(v_a)$ e maior a quantidade de células interferentes de v_a que permanecem com o mesmo número de canais disponíveis. Aplicando-se *1-Clique*, o bloqueio futuro de chamadas diminui e permite que a probabilidade de bloqueio seja baixa.

2. *Método de Rearranjo.* Geralmente é difícil rearranjar os canais de forma otimizada em tempo real. Assim, devem-se aplicar métodos aproximados para o rearranjo. O rearranjo acontece sob a condição de que nenhuma chamada em progresso seja forçada a terminar em virtude da realocação de canais. O *Rearranjo de Primeiro Nível* [29] é um dos métodos aproximados para o rearranjo. Seja $H_k(v_a)$ o conjunto das células interferentes de v_a que utilizam o canal k

$$H_k(v_a) = U_k \cap B(v_a). \quad (2.4)$$

No *Rearranjo de Primeiro Nível* [33] têm-se os seguintes passos:

- *passo 1.* Selecione um canal k , que não tenha sido selecionado ainda, como um possível candidato para o rearranjo. Bloqueie uma nova chamada se todos os canais já estiverem sido pesquisados.
- *passo 2.* Se o canal k já estiver alocado para v_a , retorne ao passo 1.
- *passo 3.* Procure um canal disponível em $v \in H_k(v_a)$. Se alguma célula em $H_k(v_a)$ não possuir um canal disponível, retorne ao passo 1.
- *passo 4.* Aloque os canais disponíveis para as células em $H_k(v_a)$ ao invés do canal k e aloque k em v_a .

No *Rearranjo de Primeiro Nível* há apenas um rearranjo de canal nas células em $B(v_a)$. A complexidade computacional é proporcional a $N^2 n_c^2$.

No *Rearranjo de r -ésimo Nível*, são necessários r diferentes rearranjos para se alocar um canal para uma nova chamada em v_a . Portanto, este método é bem mais complexo do que o *Rearranjo de Primeiro Nível* [33].

b - Novos Métodos de Rearranjo. No *Rearranjo de Primeiro Nível*, o número de canais que sofre rearranjo é igual a um, sendo este o tipo mais simples de rearranjo. Seja R o número de células interferentes de v_a onde um canal é rearranjado simultaneamente. No *Rearranjo de Primeiro Nível*

$$R = |H_i(v_a)| \quad (2.5)$$

onde i é o canal a ser rearranjado e alocado em v_a .

Nos sistemas celulares onde o *Rearranjo de Primeiro Nível* é aplicado, o estado dos canais utilizados, exceto v_a e $B(v_a)$, permanece o mesmo após o rearranjo. Assim, $X_i(v_a)$ obtido antes do rearranjo também permanece o mesmo após o rearranjo do canal i . Quando o rearranjo é necessário, isto indica que todos os canais estão alocados nas células em $B(v_a)$. Assim, $H_i(v_a) \neq \emptyset$ e

$$\left\{ \bigcup_{\substack{v_j \in U_i \\ v_j \notin B(v_a) \\ v_j \neq v_a}} B(v_j) \right\} \cap H_i(v_a) = \emptyset \quad (2.6)$$

para todo i . A Equação 2.6 informa que as células interferentes de v_a utilizando o canal i não são células interferentes das outras células que empregam o mesmo canal i . Da Equação 2.2 e 2.6, $X_i(v_a)$ pode ser reescrito como $X'_i(v_a)$ na Equação 2.7 quando uma nova chamada em v_a necessita de um rearranjo.

$$X'_i(v_a) = \left\{ \bigcup_{\substack{v_j \in U_i \\ v_j \notin B(v_a) \\ v_j \neq v_a}} B(v_j) \right\} \cap \{B(v_a) - H_i(v_a)\} \quad (2.7)$$

$K_i(v_a)$ pode ser reescrito como $K'_i(v_a)$ na equação 2.8.

$$K'_i(v_a) = B(v_a) - X'_i(v_a). \quad (2.8)$$

O limite superior de cada $|X'_i(v_a)|$ é $|B(v_a)| - R$. Então, quanto menor o valor de R , maior o limite superior. Alocando o canal i para v_a , o número de canais disponíveis em $K'_i(v_a)$ diminui e em $X'_i(v_a)$ permanece inalterado. Se i for selecionado de modo que R seja o menor valor, há mais probabilidade que $|K'_i(v_a)|$ seja menor do que de qualquer outro canal. O máximo valor de $|X'_i(v_a)|$ é $N - 1$.

1. Rearranjo Mínimo

Neste método, um rearranjo é selecionado em ordem crescente de $|H_i(v_a)|$. Após a seleção, as operações do passo 2, passo 3 e passo 4 do *Rearranjo de Primeiro Nível* são feitas. O rearranjo somente é necessário após a confirmação

que v_a não possui canais disponíveis (feitas através da pesquisa de todos os canais em uso em v_a e $B(v_a)$). Portanto, $H_i(v_a)$ já está obtido quando um rearranjo é necessário.

2. *Rearranjo 1-célula*

Se alocarmos o canal i a uma nova chamada com o *Rearranjo de Primeiro Nível*, o canal i em todas as células de $H_i(v_a)$ deverá ser rearranjado. Se rearranjarmos somente o canal i para o qual $|H_i(v_a)| \leq t$, teremos o método *Rearranjo t-célula*. A complexidade computacional do método é proporcional a tNn_c^2 .

Em *Rearranjo 1-célula*, o número de células onde o canal é rearranjado é sempre 1. Assim, o método é mais efetivo na qualidade da comunicação e há uma redução de carga nas estações base em relação ao *Rearranjo Mínimo*. A complexidade computacional do método é proporcional a Nn_c^2 .

3. *Rearranjo 1-Clique*

Após a operação do *Rearranjo de Primeiro Nível*, os canais utilizados nas células, exceto v_a e células de $B(v_a)$, continuam os mesmos. Assim, o método *1-Clique* é aplicado para alocar canal em v_a mesmo quando é necessário o rearranjo. Chamaremos tal método de *Rearranjo 1-Clique*. Neste método, não consideramos o valor de R mas de $|X_i(v_a)|$, e selecionamos o canal do rearranjo i em ordem decrescente de $|X_i(v_a)|$. Os algoritmos de rearranjo mencionados anteriormente são variantes do *Rearranjo de Primeiro Nível* e se diferenciam na maneira de selecionar um canal como candidato. No *Rearranjo 1-Clique*, entretanto, calcula-se $|X_i(v_a)|$ para todo i e pesquisam-se os canais em uso de algumas outras células do que apenas v_a e células de $B(v_a)$ para o cálculo da seleção do canal. Essas operações não são necessárias para *Rearranjo de Primeiro Nível*, *Rearranjo Mínimo* e *Rearranjo 1-célula*.

Okada e Kubota

Okada e Kubota [34] propuseram uma nova estratégia de alocação dinâmica usando a direção do movimento dos usuários para reduzir a troca de canais e queda de chamadas no *handoff*.

A estratégia do *Sentido do Movimento (SM)* tenta alocar um canal disponível para uma nova chamada entre aqueles que já estão em uso na área de serviço, mas que estejam no mesmo sentido do movimento da nova chamada em questão. Conjuntos de assinantes movendo-se no mesmo sentido e com o mesmo canal em uso são formados. Assim, quando um assinante de um conjunto cruza a fronteira de uma célula, é provável que os outros assinantes deste conjunto tenham cruzado as fronteiras das suas células. Desta forma, um assinante terá alta probabilidade de manter o mesmo canal no *handoff*. Isto diminui a probabilidade de troca de canais e queda de chamadas no *handoff*. O exemplo da Figura 2.19 ilustra a estratégia *SM*.

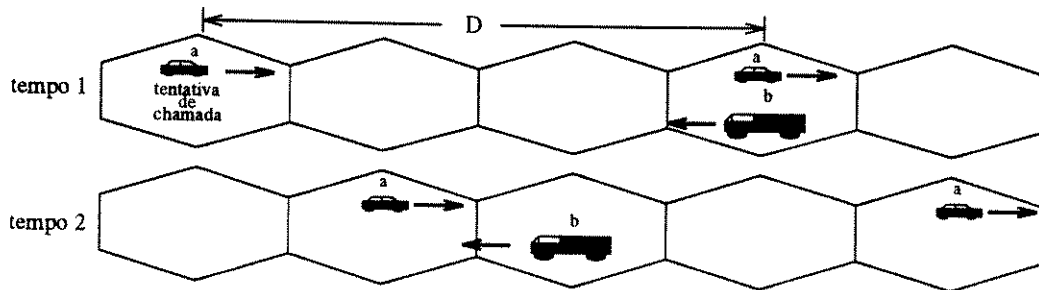


Figura 2.19: Ilustração da estratégia *SM*

Os canais disponíveis do sistema são *a* e *b*. A distância mínima de reuso é *D* e os canais *a* e *b* são usados pelos assinantes que se movem no mesmo sentido.

Como a estratégia *SM* aloca os canais de uma nova chamada no sentido do movimento, isto diminui a troca de canal e queda de chamada durante o *handoff*. De acordo com a Figura 2.19, no tempo 1 há somente uma tentativa de chamada e dois canais, *a* e *b*, disponíveis. O canal *a* está sendo usado em outra célula a uma distância *D* (distância mínima de reuso) por um assinante que está se movendo no mesmo sentido da tentativa de chamada. Portanto, a estratégia *SM* aloca o canal *a* à nova chamada. No tempo 2,

cada assinante cruza a fronteira da sua célula e ocorrem 3 *handoffs*. Entretanto não há troca de canais e nem queda de chamadas devido à característica do *SM*.

A implementação da estratégia *SM* requer o uso dos seguintes parâmetros:

- D : distância mínima de reuso;
- m_1, m_2 e V_g : distâncias tais que $m_1 \leq m_2 \leq V_g$.

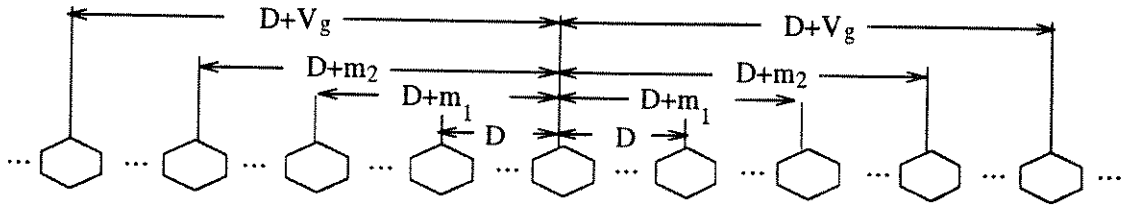


Figura 2.20: Ilustração da relação entre os parâmetros utilizados na estratégia *SM*.

Um canal está disponível na célula quando ele não está sendo utilizado nas células cujas distâncias sejam menores do que D da célula em questão. A soma $D + V_g$ é o limite superior da distância na pesquisa do canal. Quando há uma tentativa de chamada, a estratégia *SM* procura um canal disponível que esteja sendo utilizado nas células de pesquisa e movendo-se no mesmo sentido do assinante que está tentando a chamada.

A prioridade das células de pesquisa é a seguinte:

1. A célula de menor distância entre $D + m_1$ e $D + m_2$.
2. A célula de distância D .
3. A célula de menor distância entre D e $D + V_g$ (sem levar em consideração o sentido do movimento).
4. Canal que ainda não foi utilizado entre D e $D + V_g$.

Se não houver nenhum canal disponível, a tentativa de chamada é bloqueada. Se existir mais de um canal na prioridade pesquisada, o primeiro encontrado é selecionado.

No caso de uma chamada de *handoff*, se o mesmo canal estiver disponível na nova célula, ele será selecionado. Caso contrário, um novo canal será selecionado da mesma forma que uma tentativa de chamada.

Este algoritmo não considera a troca de sentido no movimento dos assinantes porque ele é proposto para uma área de serviço unidimensional. Porém a estratégia é também eficiente para áreas de serviço bi-dimensional, contanto que os assinantes não alterem o sentido do movimento durante o tempo de duração das chamadas.

A estratégia *SM* pode variar pelas alterações nos valores de m_1 e m_2 . Quando $m_1 = 0$ e $m_2 = V_g$, por exemplo, a estratégia torna-se uma *NN* [26] modificada usando a informação do sentido do movimento. Similarmente, quando $m_1 = 1$ e $m_2 = V_g$, a estratégia torna-se uma *NN+1* modificada.

Quanto maior m_1 e m_2 , maiores as distâncias entre as células usando o mesmo canal. A queda das chamadas decresce mas o bloqueio aumenta quando m_1 e m_2 são grandes. Uma estratégia que aumenta o bloqueio não é útil, mesmo se ela reduz a troca de canais e queda de chamadas nos *handoffs*. Portanto, é importante achar um valor adequado para m_1 e m_2 levando-se em consideração as condições da área de serviço: D , tamanho da célula, velocidade dos assinantes, tráfego oferecido, etc.

2.2.4 Alocação Híbrida de Canais

Esta técnica é uma combinação da alocação fixa e dinâmica. Uma parte dos canais da célula é pré-alocada de forma fixa, e o restante dos canais é alocado de forma dinâmica de acordo com o comportamento do tráfego. Por exemplo, numa área de serviço com T canais, dividimos os canais em dois conjuntos A e B , não necessariamente iguais. O conjunto A contém os canais utilizados na alocação fixa e o conjunto B os canais da alocação dinâmica. O desempenho desta técnica depende tanto da distribuição de tráfego como da relação de canais fixos/dinâmicos.

Kahwa e Georganas [35] consideraram o problema da alocação de canal em sistemas de comunicações móveis, onde a área de serviço é dividida em células hexagonais. Em

particular, o esquema da alocação híbrida de canais foi estudado através da simulação de um modelo com 40 células.

Yue [36] propôs duas técnicas aproximadas para o cálculo do desempenho de um sistema celular utilizando a alocação híbrida de canais. Estas técnicas aproximadas fornecem os estados de equilíbrio da distribuição de probabilidade do sistema que são usados para obter expressões para os bloqueios.

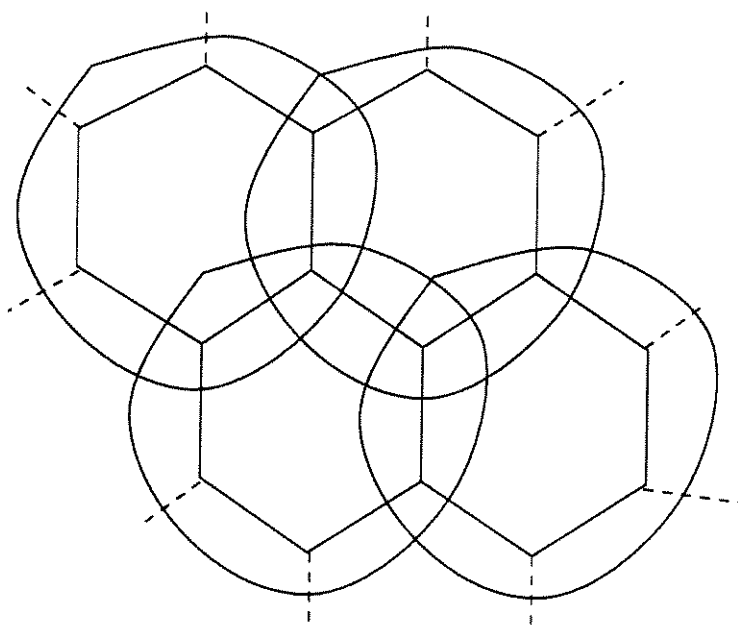


Figura 2.21: Área de cobertura hipotética

2.3 Técnicas Locais de Alocação

A estrutura celular é um modelo ideal. Na prática, a área de cobertura de um sistema rádio móvel não é hexagonal, e toma diversas formas de acordo com os obstáculos que o sinal transmitido encontra no seu caminho de propagação [9]. A Figura 2.21 mostra uma área de cobertura hipotética para um sistema rádio móvel celular, onde é comparada à

área hexagonal ideal. Na Figura 2.21 observam-se áreas de sobreposição entre células. Se uma estação móvel encontra-se nessa área poderá ter boa comunicação com mais de uma estação base. O tráfego gerado nesta região, nomeado de flexível, poderá ser utilizado convenientemente para melhorar o desempenho do sistema.

Este fato é amplamente explorado pelas *Técnicas Locais de Alocação* e algumas delas são descritas a seguir [37, 38, 39, 40].

2.3.1 Adaptação pela Média (Mean Adaptation - MAP)

Baseia-se nas estimativas do tráfego médio sem o conhecimento das condições de bloqueio das células. 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. Neste caso o tráfego flexível é dividido na proporção inversa do desbalanceamento de tráfego entre as células de forma a se restaurar a condição de balanceamento.
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 apropriada do tráfego flexível. Neste caso, todo o tráfego flexível será desviado para a célula com menor tráfego médio.

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 planejada para o próximo intervalo.

2.3.2 Resposta Adaptativa ao Bloqueio (Adaptive Response to Blocking - ARB)

Baseia-se no conhecimento das condições de bloqueio das células. As chamadas identificadas como flexíveis em uma célula são encaminhadas às células vizinhas na ocorrência de bloqueio de sua própria célula.

Esta estratégia é empregada somente na ocorrência de bloqueio. Ela será bem sucedida a menos que o móvel esteja na região do tráfego flexível e a outra célula não esteja bloqueada. Existem as chamadas flexíveis potenciais, ou seja, aquelas que não são identificadas como tais quando suas próprias células ainda possuem canais livres disponíveis. É razoável supor que estas chamadas, em média, sejam divididas nas duas células na mesma proporção que o outro tipo de tráfego.

2.3.3 Adaptação a Média e ao Bloqueio (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. Todas as considerações sobre a MAP são aplicadas para a AMB. A diferença entre as duas estratégias é que na AMB as chamadas bloqueadas em uma célula podem ser desviadas para outras células vizinhas.

2.3.4 Adaptação Instantânea (Instantaneous Adaptation - IAP)

Baseia-se no conhecimento instantâneo do estado do tráfego, ou seja, no número de canais ocupados das células em cada instante. 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.

2.3.5 Adaptação Instantânea e pela Média (Instantaneous and Mean Adaptation - IMA)

Baseia-se no conhecimento do número de canais ocupados das células em cada instante e no do tráfego médio. As decisões são as mesmas da técnica IAP, exceto no caso em que as células possuem o mesmo número de canais livres. Neste caso o procedimento é direcionar o tráfego flexível para a célula menos carregada.

2.3.6 Variação do Limiar de Bloqueio (VLB)

A VLB direciona 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.

Por se tratar de parte integrante deste trabalho de tese esta técnica será descrita em detalhes no Capítulo 5.

2.4 Sumário e Conclusões

Os algoritmos de alocação de canais podem ser reunidos em duas categorias: *Técnicas Globais de Alocação (TGA)* e *Técnicas Locais de Alocação (TLA)*.

O grupo TGA é dividido em quatro tipos de alocação: fixa, dinâmica, híbrida, e por empréstimo. Na alocação fixa, um número fixo de canais do sistema é pré-alocado a cada célula de acordo com o perfil do tráfego pré-definido. Na alocação dinâmica, todos os canais do sistema estão disponíveis para todas as células. A alocação híbrida é uma combinação da fixa com a dinâmica. Na alocação por empréstimo ocorre o empréstimo de canais de células vizinhas quando todos os canais da célula em questão se encontram ocupados.

Das quatro alocações, a fixa é a mais simples de se implementar e aquela que exige o menor processamento, pois não requer o conhecimento do estado do sistema inteiro, apenas o da sua própria célula. Entretanto, para baixo tráfego, a alocação dinâmica apresenta

um bloqueio menor do que aquele da fixa. Além disso, o bloqueio de handoff é menor. Por outro lado, para sistemas de alto tráfego, a alocação dinâmica apresenta um bloqueio mais alto do que o da fixa. Outra desvantagem da alocação dinâmica é o maior número de equipamento (rádio) requerido para cada estação base. O processamento também é mais demorado, pois é necessário conhecer o estado do sistema inteiro para alocar um canal. A alocação híbrida e por empréstimo situam-se entre a fixa e a dinâmica. A alocação por empréstimo é mais próxima da fixa, e a híbrida da dinâmica.

O modelamento matemático destes algoritmos só é possível para situações bem simples (poucos canais, ausência de handoff, sistema de pequeno porte, etc) e que não reflete o comportamento de um sistema real. Um modelamento analítico considerando os principais fenômenos de um sistema real é inviável. Deste modo, utiliza-se largamente a simulação de Monte-Carlo na análise das diversas alocações.

O grupo TLA é caracterizado por estratégias de encaminhamento alternativo em que o tráfego da área de sobreposição entre células adjacentes é utilizado, e reúne seis algoritmos: Adaptação pela Média (MAP), Resposta Adaptativa ao Bloqueio (ARB), Adaptação pela Média e ao Bloqueio (AMB), Adaptação Instantânea (IAP), Adaptação Instantânea e pela Média (IMA), e Variação do Limiar de Bloqueio (VLB). A MAP baseia-se nas estimativas do tráfego médio sem o conhecimento das condições de bloqueio das células. A ARB baseia-se no conhecimento das condições de bloqueio das células. A AMB baseia-se na combinação de MAP e ARB, ou seja, as condições do tráfego médio e de bloqueio das células são conhecidas. A IAP baseia-se no conhecimento instantâneo do estado do tráfego, ou seja, no número de canais ocupados das células em cada instante. A IMA baseia-se no conhecimento do número de canais ocupados das células em cada instante e do tráfego médio. A VLB baseia-se no conhecimento do valor instantâneo e da média do tráfego. As decisões de encaminhamento de tráfego levam em consideração um limiar de ocupação de canais determinado no projeto de sistema.

Capítulo 3

Modelo de Tráfego e Sistemas de Grande Porte

Neste capítulo são analisados os aspectos *qualitativos* e *quantitativos* para a modelagem dos fenômenos de tráfego envolvidos num sistema celular de grande porte. Em particular definem-se os parâmetros de desempenho e os sistemas celulares a serem utilizados neste trabalho.

A Seção 3.1 analisa o modelo de tráfego considerando três tipos diferentes de chamadas. A Seção 3.2 analisa a geração de tráfego móvel, descrevendo a sequência de eventos ocorrendo em cada uma das partes envolvidas no sistema móvel. De maneira semelhante a Seção 3.3 analisa o fenômeno de *handoff*. A Seção 3.4 define os parâmetros de desempenho associados ao tráfego dos sistemas celulares. Em particular, propõe-se um novo parâmetro de desempenho - o *desbalanceamento* - associado à distribuição de tráfego do sistema e que espelha como esta distribuição varia com a aplicação dos algoritmos de alocação de canais. A Seção 3.5 descreve os sistemas celulares que servirão de plataforma para os algoritmos de alocação de canais propostos neste trabalho. A Seção 3.6 delinea as principais conclusões deste capítulo.

3.1 Modelo de Tráfego

Suponha um *sistema móvel celular* conectado à rede fixa com um grande número de assinantes móveis. Considere o processo de ocupação de canais do sistema móvel devido à 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* destas chamadas ocorra como processos de *Poisson* com as características mostradas na Tabela 3.1.

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 3.1: Taxas de chamada em uma célula

Suponha que, para os três respectivos tipos de tráfego, A_{FM} , A_{MF} , e A_{MM} os tempos médios de duração das chamadas, h_{FM} , h_{MF} , e h_{MM} sejam idênticos e distribuídos de acordo com uma exponencial negativa. Assim

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

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

$$A = A_{FM} + A_{MF} + 2 A_{MM} \quad (3.2)$$

Definindo λ como a taxa de chegada equivalente, então

$$\lambda h = \lambda_{FM} h_{FM} + \lambda_{MF} h_{MF} + 2 \lambda_{MM} h_{MM} \quad (3.3)$$

Quando uma área de serviço é dividida em células ou setores, o tráfego total será distribuído pelas células ou setores de acordo com o tamanho das células e setores e com a concentração de estações móveis. Os procedimentos para os três tipos de chamada serão os mesmos, 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.

Em uma área de serviço uncelular não há distinção entre o tempo da duração da chamada e o tempo de ocupação do canal. Já 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 liberam o canal anterior para completar a chamada. Existem mais requisições de canais do que novas tentativas de chamadas. O tempo de ocupação do canal é menor do que o tempo da chamada.

3.2 Geração de Tráfego Móvel

As Figuras 3.1 a 3.2 ilustram o modelo básico do tráfego móvel [43]. A linha vertical cheia e os blocos ligados a ela indicam ações que ocorrem em cada uma das partes envolvidas no sistema móvel. Simplificadamente, do ponto de vista do controle das chamadas, estas partes são:

- Centro de Controle e Comutação (CCC), que centraliza o controle da alocação de canal;
- Estação Base (ERB), que transita as mensagens entre CCC e EM;
- Estação Móvel (EM), que controla as atividades relacionadas a handoff, tais como:
 - detecção dos níveis de potência que levam ao handoff;

- indicação da nova ERB onde o sinal é melhor recebido;
- retentativas de handoff e bloqueio da chamada se o período de *timeout* expirar.

As linhas diagonais indicam mensagens entre as partes envolvidas. As linhas tracejadas representam canais de rádio entre EMs e ERBs, e as linhas cheias qualquer tipo de conexão fixa entre ERBs e CCC. Eventos acontecem em seqüência 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.

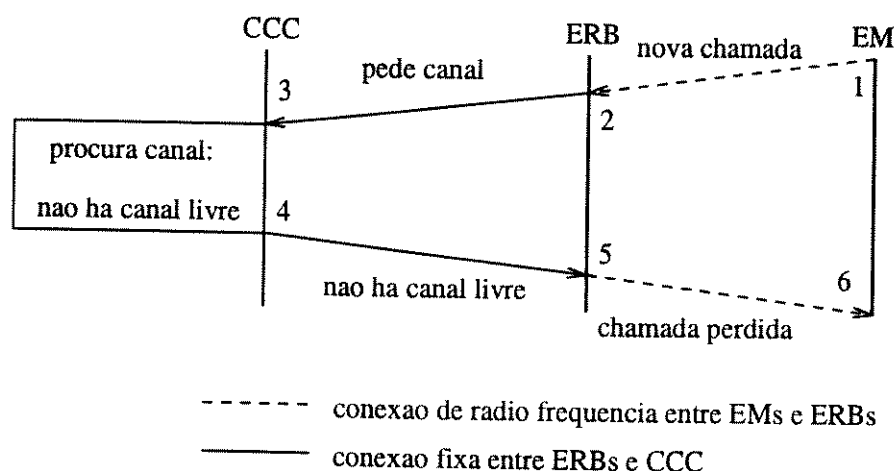


Figura 3.1: Bloqueio de nova chamada

A construção do modelo de tráfego é iniciada considerando-se as chamadas bloqueadas como perdidas. Caso não haja handoff, o sistema terá um comportamento análogo ao das Figuras 3.1 e 3.2. Na Figura 3.1 a ERB requisita um canal para uma nova chamada, mas não há canal disponível na 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 as seqüências 3 e 4. O tempo entre 6 e 7 é dado pela distribuição da duração da chamada.

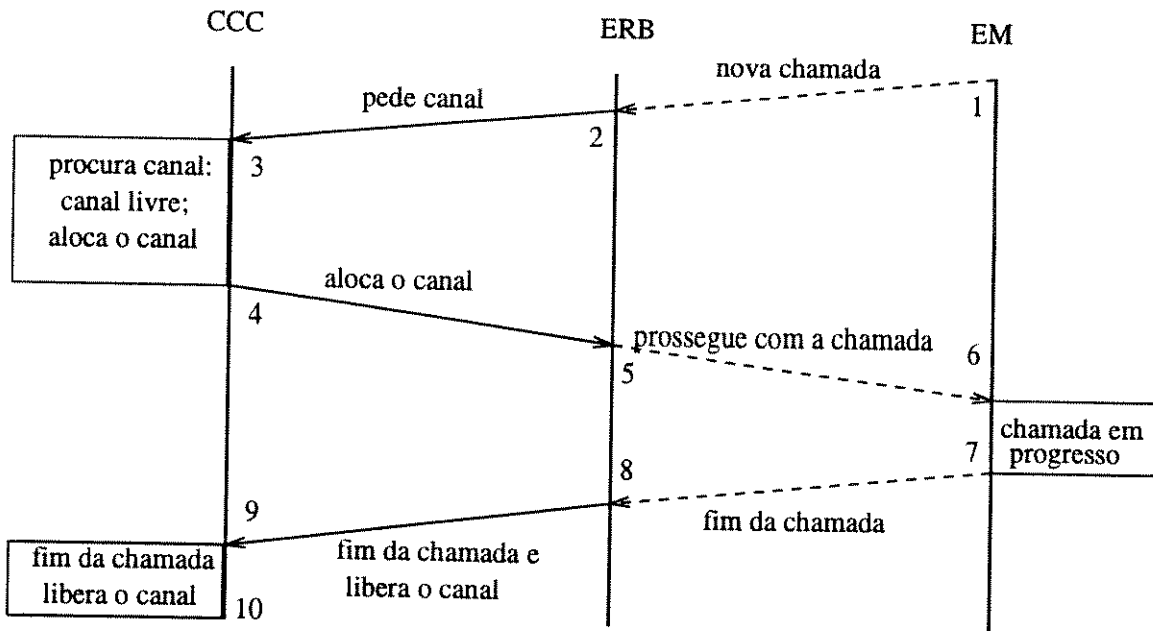


Figura 3.2: Chamada com sucesso sem handoff

Até este ponto, sem considerações de handoff, o tráfego gerado em cada célula pode ser visto como um processo de *Poisson* para chegada de chamadas, sendo que a duração de chamadas segue uma distribuição exponencial negativa.

3.3 Handoff

A necessidade de handoff será detectada tanto pela EM como pela ERB quando o nível do sinal do canal cair abaixo de um determinado valor (*threshold*). Cada ERB 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, a EM correspondente detecta a diminuição no nível do sinal. A EM compara a intensidade dos

canais de sinalização das células vizinhas, e a ERB 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 handoff consiste de repetidas tentativas durante um período de tempo, conforme ilustrado nas Figuras 3.3 e 3.4.

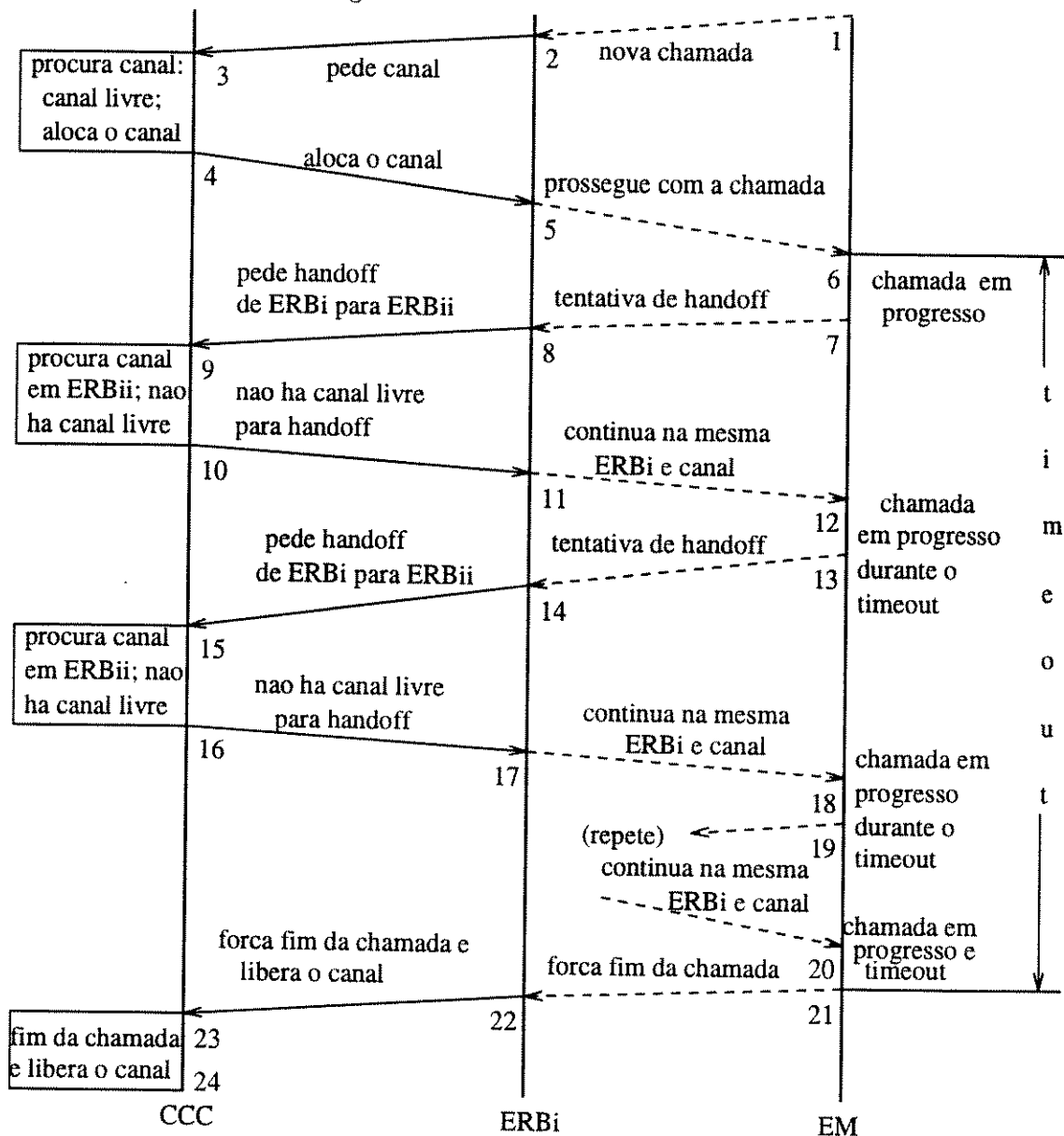


Figura 3.3: Chamada com sucesso sem completar o handoff

Note na Figura 3.3 que do evento 1 até o evento 6 tem-se o estabelecimento de uma

chamada, como já mostrado na Figura 3.2.

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

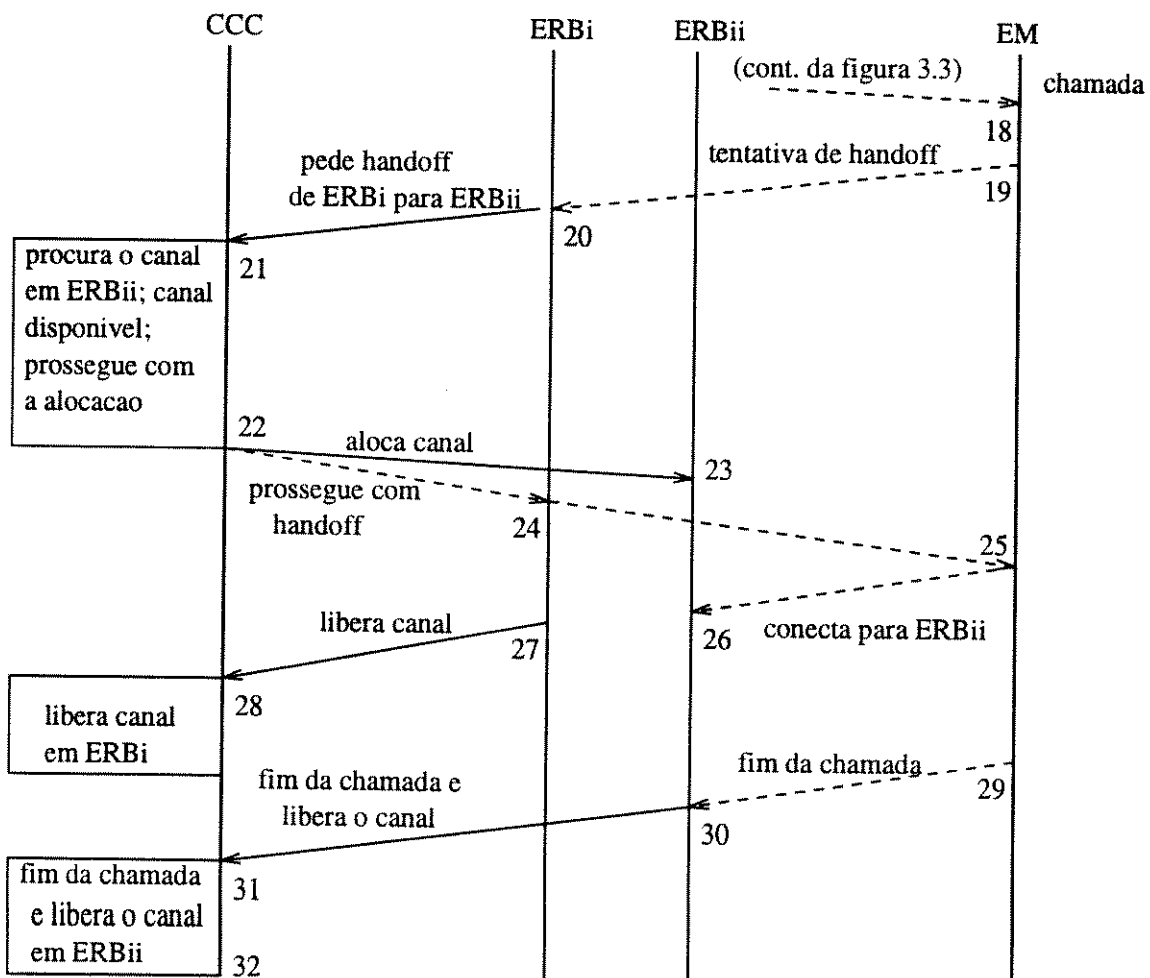


Figura 3.4: Chamada com sucesso completando o handoff

A Figura 3.4 mostra a situação de um handoff completado com sucesso. Até o evento 18 a situação é similar àquela da Figura 3.3, porém a primeira tentativa de handoff é feita com sucesso. Em 22 a CCC instrui a ERBii a preparar um canal para a EM que está chegando. Simultaneamente, a EM emite a ordem para alterar sua conexão da ERBi para ERBii, liberando o canal em ERBi e procedendo como se fosse o final de uma chamada.

Em implementações reais este procedimento de handoff 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 *timeout* não tenha expirado.

3.4 Parâmetros de Desempenho

De uma forma geral o desempenho de tráfego do sistema será avaliado através da probabilidade de bloqueio. Além disso propõe-se o uso de um novo parâmetro, o desbalanceamento, a ser introduzido nesta seção. Como será visto, esta nova medida constitui uma escala que avalia o nível de desbalanceamento de tráfego do sistema.

A probabilidade de bloqueio será usada para se avaliar o desempenho dos algoritmos de alocação de canais relativamente ao aumento de capacidade de tráfego do sistema. O desbalanceamento, por seu turno, avaliará a redistribuição de tráfego do sistema com a aplicação destes algoritmos.

3.4.1 Probabilidade Média de Bloqueio

Seja B_i a probabilidade de bloqueio da célula i onde A_i é o tráfego oferecido. Então para um sistema de n células a probabilidade de bloqueio médio B_m será

$$B_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.4)$$

onde $A = \sum_{i=1}^n A_i$ é o tráfego total.

3.4.2 Desbalanceamento de Tráfego

Seja A_m o tráfego médio do sistema, tal que

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = \frac{1}{n} A \quad (3.5)$$

Define-se o desbalanceamento individual β_i da célula i como

$$\beta_i \triangleq \frac{A_i - A_m}{A_m} \quad (3.6)$$

Da Equação 3.6 tem-se que

$$-1 \leq \beta_i \leq n-1 \quad (3.7)$$

A interpretação de β_i pode ser feita de forma direta:

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

Da definição do desbalanceamento individual tem-se

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 0 \quad (3.8)$$

Manipulando as Equações 3.5 e 3.6 conclui-se que

$$A_i = \frac{A}{n}(1 + \beta_i) \quad (3.9)$$

Supondo a probabilidade de bloqueio da célula i , seja B_i dado pela fórmula *Erlang-B* para N canais, então

$$B_i = E[A_i, N] = E\left[\frac{A}{n}(1 + \beta_i), N\right] \quad (3.10)$$

onde

$$E[A, N] = \frac{A^N / N!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (3.11)$$

Desta forma o bloqueio médio será

$$B_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 + \beta_i) E\left[\frac{A}{n}(1 + \beta_i), N\right] \quad (3.12)$$

Para facilitar a notação defina

$$f(x) \triangleq E[x, N]$$

ou

$$f[x(1 + \beta_i)] \triangleq E\left[\frac{A}{n}(1 + \beta_i), N\right] \quad (3.13)$$

Suponha $f(x)$ expandível em série de potências. Assim

$$f(x) = \sum_k a_k x^k \quad (3.14)$$

Considere

$$g(x) = x^m f(x) = \sum_k a_k x^{k+m} \quad k, m \geq 0 \quad (3.15)$$

Diferenciando ambos os lados da Equação 3.15 j vezes tem-se

$$\begin{aligned} g^{(j)}(x) &= \sum_k (k+m)^{(j)} x^{k+m-j} \\ &= j! \sum_k a_k x^{k+m-j} \binom{k+m}{j} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Ou

$$\sum_k a_k x^k \binom{k+m}{j} = \frac{x^{j-m}}{j!} g^{(j)}(x) \quad (3.17)$$

Especificamente para $m = 1$

$$\sum_k a_k x^k \binom{k+1}{j} = \frac{x^{j-1}}{j!} g^{(j)}(x) \quad (3.18)$$

Escrevendo B_m (Equação 3.12) em função de $f(x)$ expandida em série (Equação 3.14) obtém-se

$$B_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_k a_k x^k (1 + \beta_i)^{k+1} \quad (3.19)$$

Assim

$$B_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_k a_k x^k \sum_j \binom{k+1}{j} \beta_i^j \quad (3.20)$$

Ou

$$B_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_j \beta_i^j \sum_k a_k x^k \binom{k+1}{j} \quad (3.21)$$

Usando a Equação 3.17 na somatória mais interna da Equação 3.21 vem

$$B_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_j \beta_i^j \frac{x^{j-1}}{j!} g^{(j)}(x) \quad (3.22)$$

Aproximando-se a equação *Erlang-B* pela distribuição de *Poisson* para N grande, i.e.,

$$f(x) = E[x, N] \approx \frac{x^N}{N!} \exp(-x)$$

obtém-se

$$g(x) \triangleq x f(x) = \frac{x^{N+1}}{N!} \exp(-x) \quad (3.23)$$

Substituindo-se a Equação 3.23 na Equação 3.22 vem

$$B_m = \frac{1}{n} \{ n f(x) + \sum_{i=1}^n \beta_i f(x) (N+1-x) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i^2 f(x) \left[\frac{1}{2} N(N+1) - (N+1)x + \frac{1}{2} x^2 \right] + O(\beta^3) \} \quad (3.24)$$

Como $\sum_{i=1}^n \beta_i = 0$ e $f(x) = E\left[\frac{A}{n}, N\right]$, tem-se finalmente

$$B_m \simeq E\left[\frac{A}{n}, N\right] [1 + \mathcal{K} \beta^2] \quad (3.25)$$

onde

$$\mathcal{K} \triangleq \frac{n-1}{2} \left[N(N+1) - 2(N+1) \frac{A}{n} + \left(\frac{A}{n} \right)^2 \right]$$

e

$$\beta^2 \triangleq \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \beta_i^2 \quad (3.26)$$

O parâmetro β da Equação 3.26 será denominado desbalanceamento global do sistema, ou simplesmente desbalanceamento, variando entre

$$0 \leq \beta \leq 1$$

onde $\beta = 0$ implica sistema balanceado e $\beta \neq 0$ sistema desbalanceado, o desbalanceamento crescendo à medida que β se aproxima de 1. O caso $\beta = 0$ ocorre para

$\beta_i = 0, i = 1, \dots, n$, situação em que todas as células suportam o mesmo tráfego, igual ao tráfego médio. O caso $\beta = 1$ ocorre para qualquer célula com desbalanceamento igual a $n-1$ e todas as demais $n-1$ células com desbalanceamento igual a -1 . Neste caso todo o tráfego estará concentrado em uma única célula.

3.4.3 Avaliação do Parâmetro Desbalanceamento

O parâmetro desbalanceamento, dada pela Equação 3.25, foi comparada com o bloqueio médio exato, dado pela Equação 3.12, utilizando-se um sistema celular com diferentes distribuições de tráfego. No exemplo aqui mostrado considera-se um sistema celular com sete células e dez canais por célula, onde o tráfego total é de 35 erl. Várias distribuições de tráfego foram exercitadas a fim de que o parâmetro desbalanceamento pudesse variar de 0 a 1. As curvas exata e aproximada são mostradas na Figura 3.5

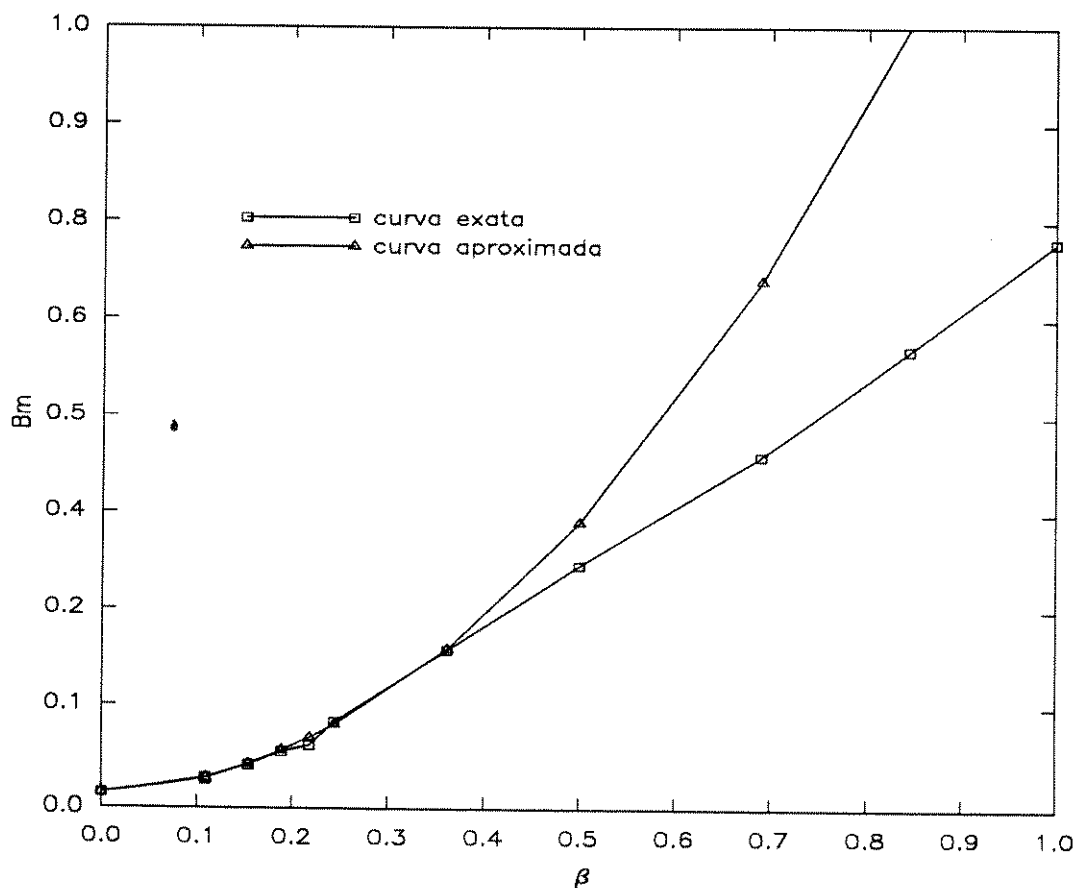


Figura 3.5: Bloqueio Médio versus Desbalanceamento

Note que as curvas exata e aproximada são razoavelmente coincidentes para uma larga extensão do parâmetro desbalanceamento. Note também que, dentro da faixa de similaridade entre as curvas, as probabilidades de bloqueio correspondentes são aquelas utilizadas em aplicações de engenharia. Portanto, o parâmetro desbalanceamento, proposto neste trabalho, poderá ser utilizado como um parâmetro de performance para avaliar como o balanceamento de tráfego é afetado com a aplicação de uma determinada estratégia de alocação de canal.

3.4.4 Extensão do Conceito de Desbalanceamento

O parâmetro desbalanceamento foi definido para sistemas com células de mesma capacidade, i.e, células com mesmo número de canais. Na prática as células podem ter números diferentes de canais, e a definição de desbalanceamento individual dada pela Equação 3.6 não é apropriada. Por exemplo, na situação em que o tráfego oferecido é o mesmo para todas as células mas cada célula possui números diferentes de canais a Equação 3.6 prevê tráfego balanceado, enquanto que na realidade o desbalanceamento está presente. A fim de considerar isto redefiniremos o fluxo de tráfego aparecendo na Equação 3.6 como sendo aquele correspondendo ao *tráfego cursado*, e não o *tráfego oferecido* como antes. O desbalanceamento da Equação 3.26 é então usado.

3.5 Sistemas Celulares Considerados

Nos estudos de desempenho de tráfego deste trabalho serão convenientemente considerados três sistemas celulares de grande porte, a saber:

- Sistema Infinito Balanceado.
- Sistema Infinito Desbalanceado.
- Sistema Real.

O sistema infinito é reconhecidamente útil por fornecer bons resultados estatísticos [44]. A utilização de sistemas infinitos balanceados e desbalanceados permite comparar

o efeito do desbalanceamento de tráfego no desempenho de tráfego dos algoritmos de alocação de canais. Um sistema real permite verificar a eficácia destes algoritmos na prática, para uma aplicação específica.

3.5.1 Sistema Infinito Balanceado

Considere um sistema como o da Figura 3.6, onde cada célula é circundada sempre por outras seis. O padrão de 7 células é repetido “indefinidamente” originando um sistema “infinito”.

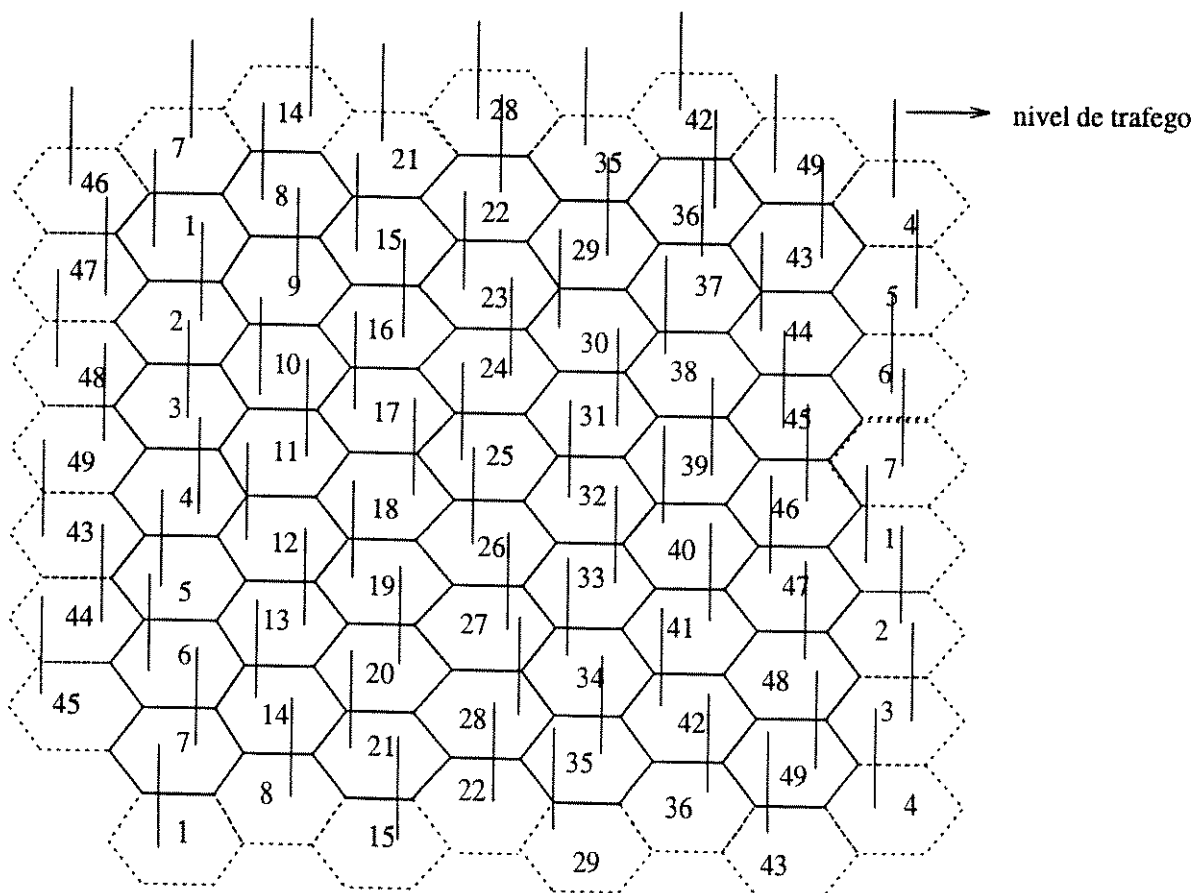


Figura 3.6: Sistema infinito balanceado

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 em uma superfície *toroidal*. Conseqüentemente, qualquer assinante móvel estará sempre dentro de uma área de serviço. No sistema infinito balanceado todas as células possuem o mesmo tráfego e também o mesmo número de canais. Em particular, o sistema aqui em estudo considera cada célula com 15 canais e um tráfego inicial por célula, a ser normalizado, de 8 erl (tráfego total de $8 \times 49 = 392$ erl). Neste caso os desbalanceamentos individuais teóricos são nulos ($\beta_i = 0, i = 1, \dots, 49$) e, conseqüentemente, o desbalanceamento teórico do sistema também é nulo ($\beta = 0$).

A Figura 3.7 mostra os desbalanceamentos individuais das células obtidas por simulação. O correspondente desbalanceamento (simulado) do sistema é de $\beta = 0.0035273$.

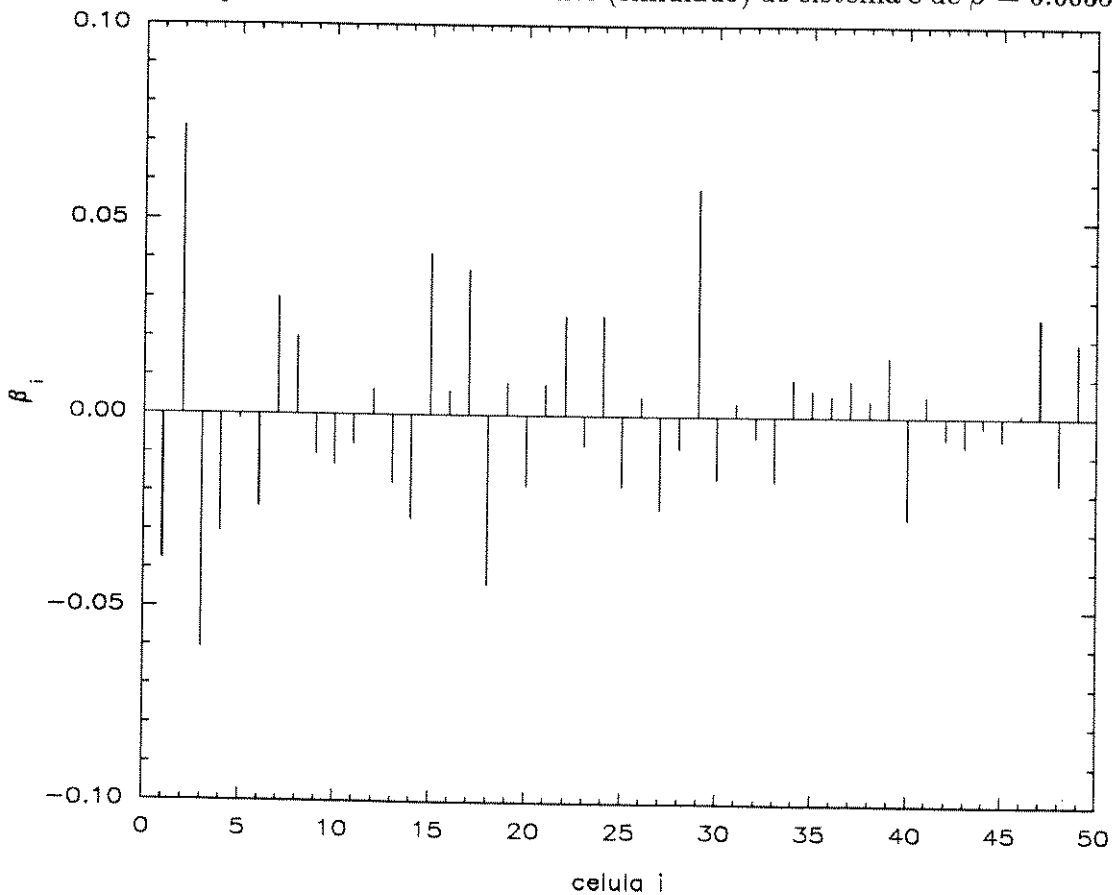


Figura 3.7: Desbalanceamento individual: sistema infinito balanceado

3.5.2 Sistema Infinito Desbalanceado

A disposição das células deste sistema é idêntica àquela do sistema infinito balanceado. No entanto as células apresentam perfis diversos de tráfego caracterizadas por níveis diferentes de tráfego e/ou números diferentes de canais.

A Figura 3.8 ilustra o sistema infinito desbalanceado com o correspondente perfil de tráfego onde se nota uma maior concentração de tráfego nas células centrais. Esta é uma situação comumente encontrada na prática.

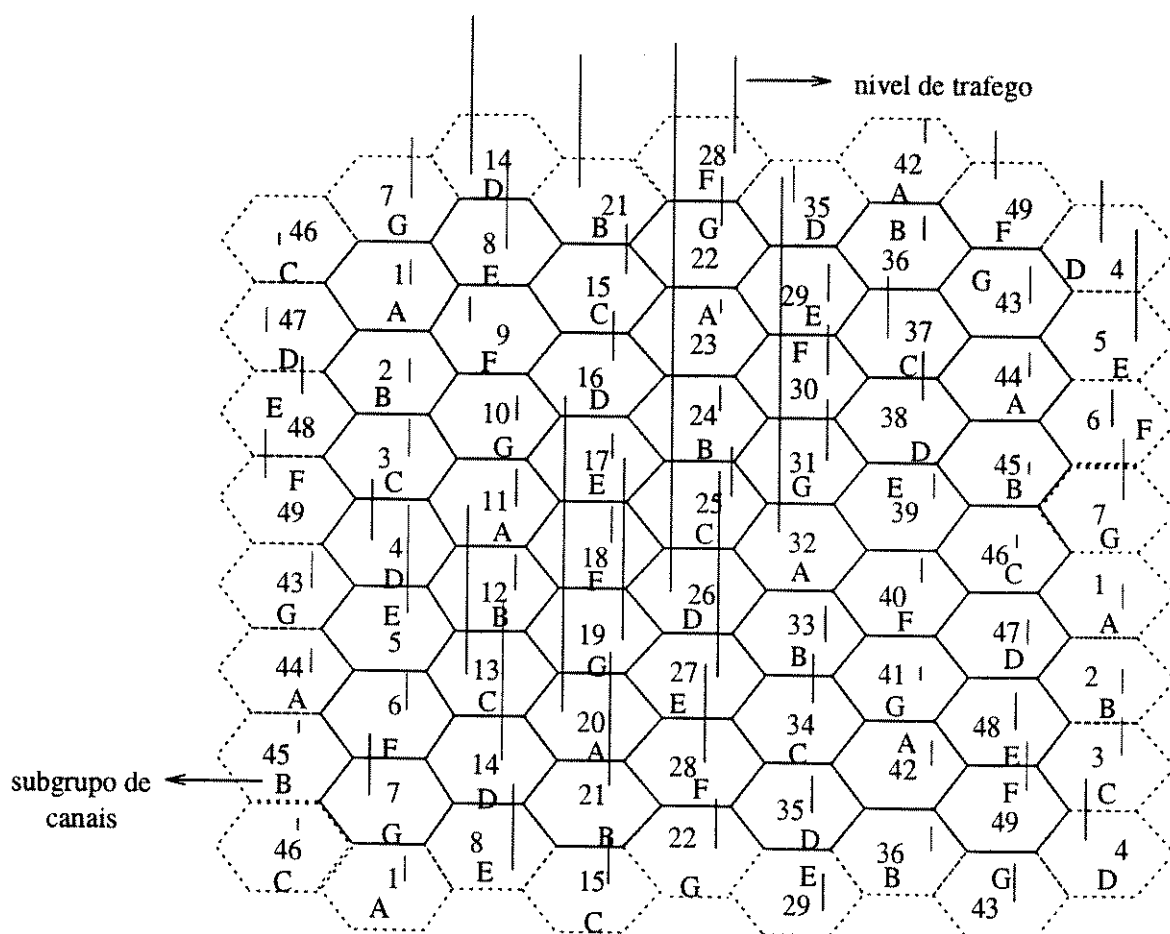


Figura 3.8: Sistema infinito desbalanceado

Para evitar a interferência cocanal, um mesmo canal só será alocado a uma outra célula respeitando-se a distância mínima de reuso das células. O número de canais em

cada célula é determinado de acordo com o tráfego. 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, utilizando-se a fórmula *Erlang-B* (Equação 3.11).

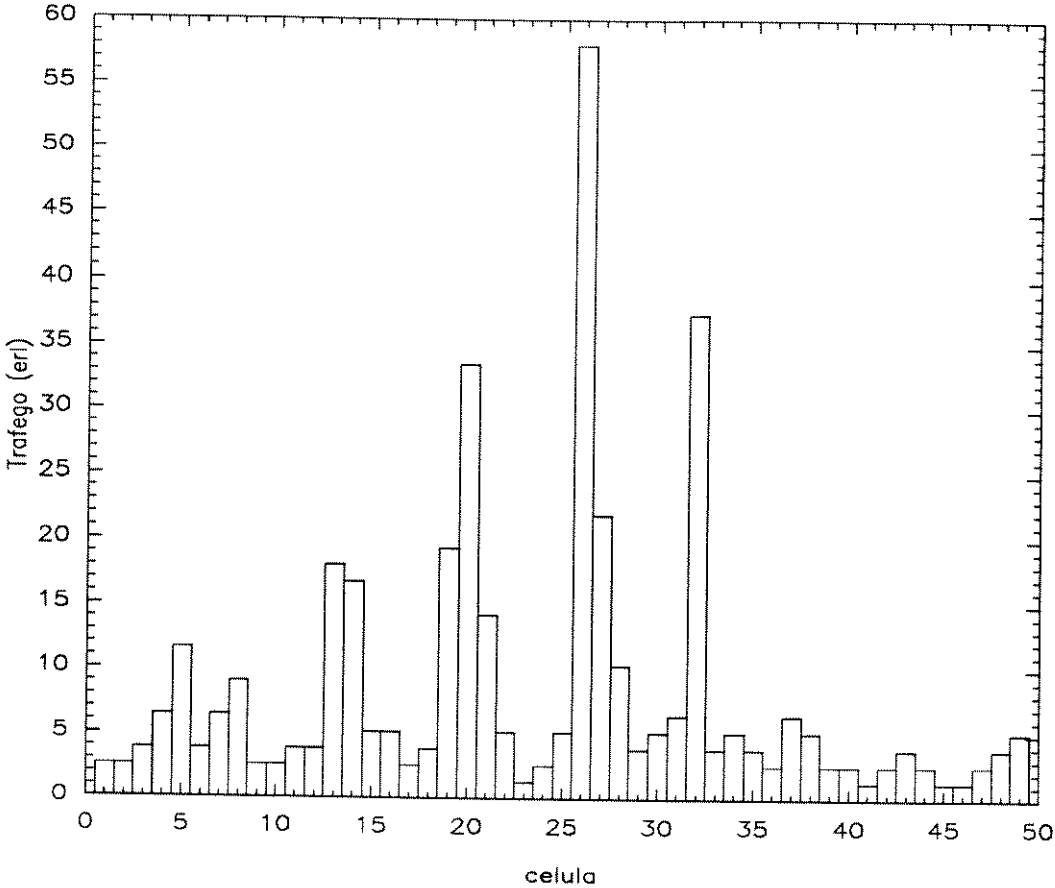


Figura 3.9: Tráfego individual das células do sistema infinito desbalanceado

Grupo	A	B	C	D	E	F	G
Nº canais	47	21	25	69	30	16	27

Tabela 3.2: Grupo de canais do sistema infinito desbalanceado

No sistema considerado o tráfego total inicial, a ser normalizado, é de $8 \times 49 = 392 \text{ erl}$. Para o perfil de tráfego detalhado na Figura 3.9 e para um bloqueio de 2% o número de

canais por grupo de frequências é calculado na Tabela 3.2.

A Figura 3.10 mostra os desbalanceamentos individuais das células, onde a primeira linha (mais fina) é o desbalanceamento individual *teórico* e a segunda linha (mais cheia) é o desbalanceamento individual *simulado*. Observe que os desbalanceamentos individuais obtidos por simulação são muito próximos dos teóricos. O correspondente desbalanceamento do sistema é de $\beta = 0.1869411$ para o teórico, e de $\beta = 0.1858062$ para o simulado.

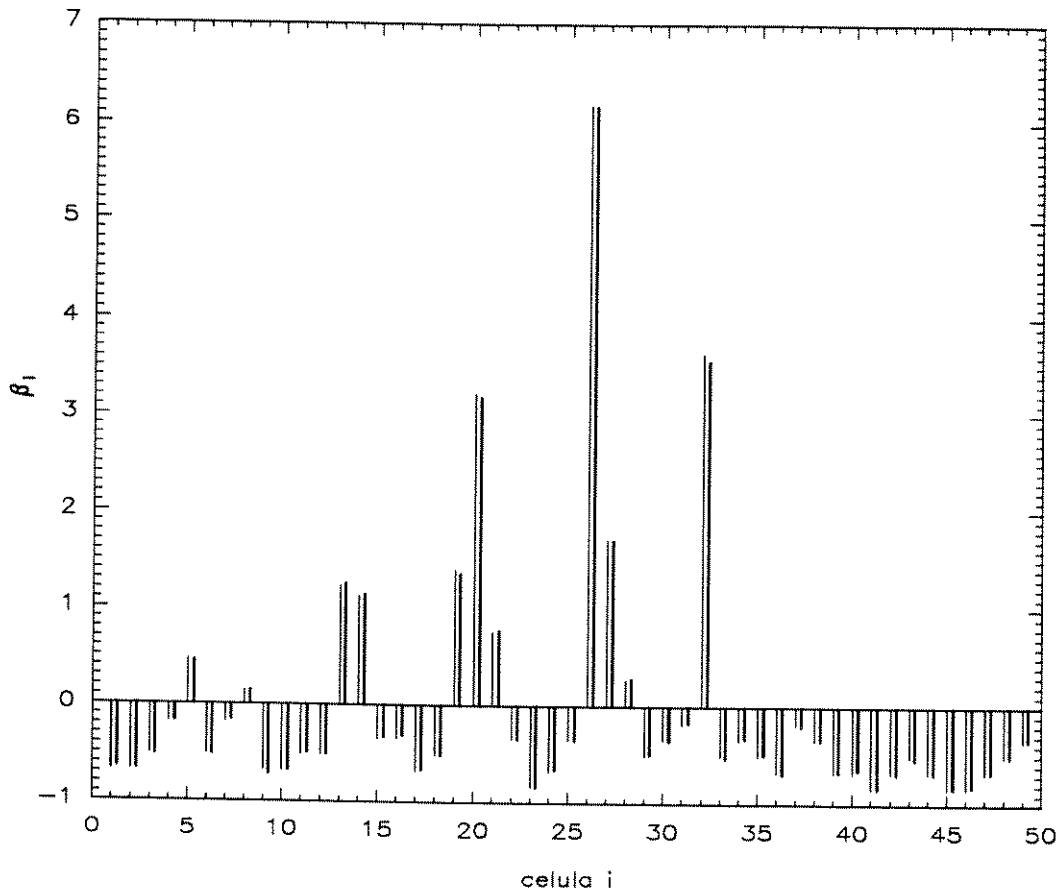


Figura 3.10: Desbalanceamento individual para o sistema infinito desbalanceado: teórico (linha fina) e simulado (linha cheia)

3.5.3 Sistema Real

Considere um sistema real como o da Figura 3.11 [45]. Em relação ao sistema infinito, o número de células vizinhas às células mais externas é menor do que seis, ou seja, o sistema é limitado nas suas fronteiras.

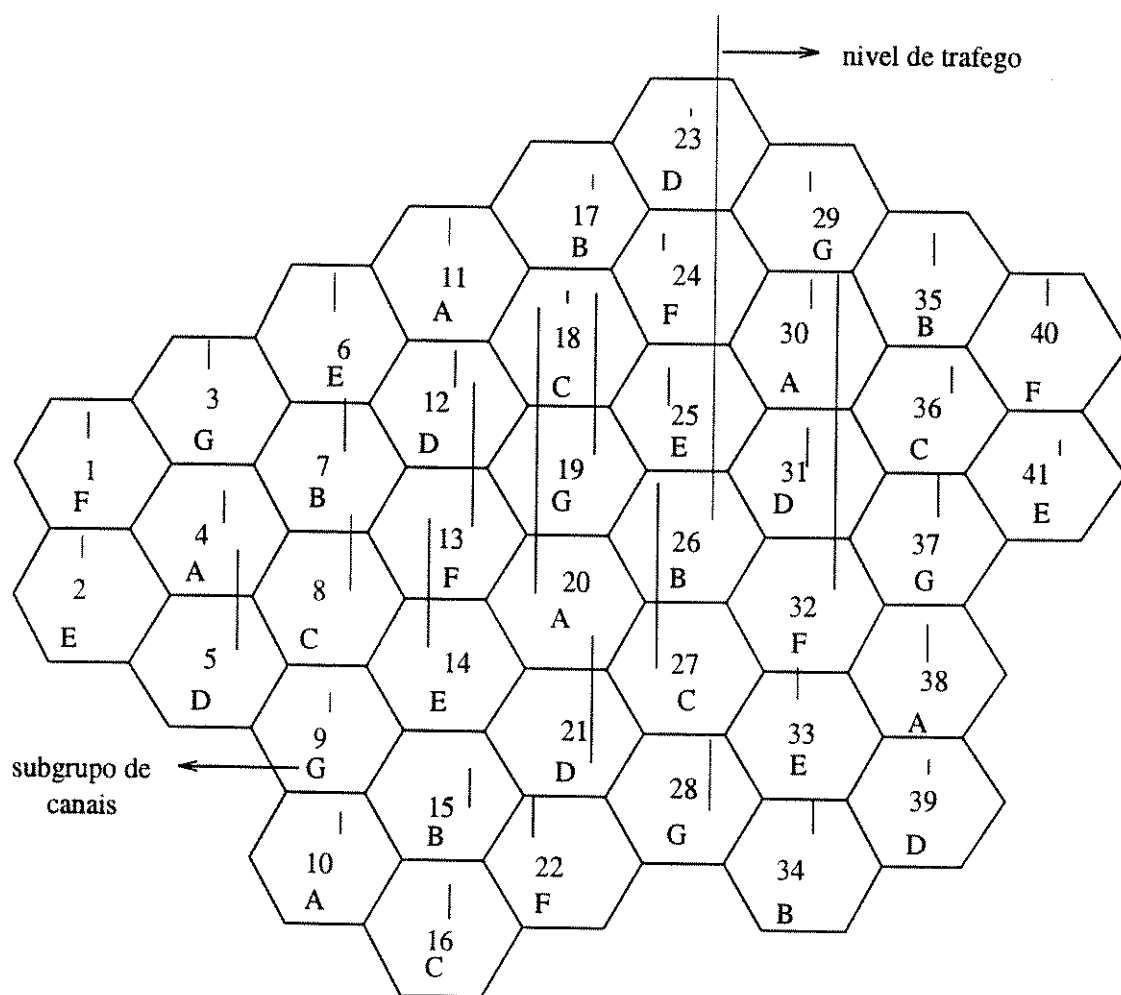


Figura 3.11: Sistema real na hora de maior movimento

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

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.

No sistema considerado o tráfego total inicial, a ser normalizado, é de 250 erl. Para o perfil de tráfego detalhado na Figura 3.12 e para um bloqueio de 2% o número de canais por grupo de frequências é calculado na Tabela 3.3.

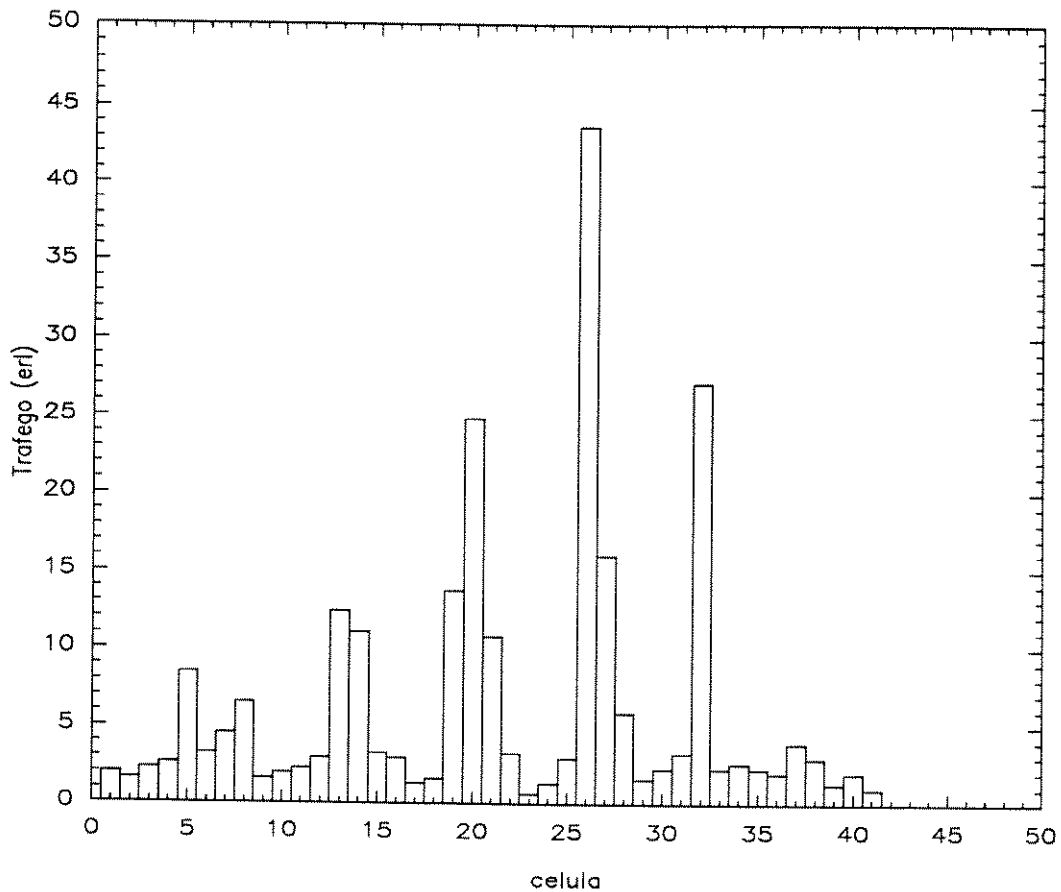


Figura 3.12: Tráfego individual das células do sistema real

Grupo	A	B	C	D	E	F	G
Nº canais	33	54	24	17	18	35	20

Tabela 3.3: Grupo de canais do sistema real

A Figura 3.13 mostra os desbalanceamentos individuais das células, onde a primeira linha (mais fina) é o desbalanceamento individual *teórico* e a segunda linha (mais cheia) é o desbalanceamento individual *simulado*.

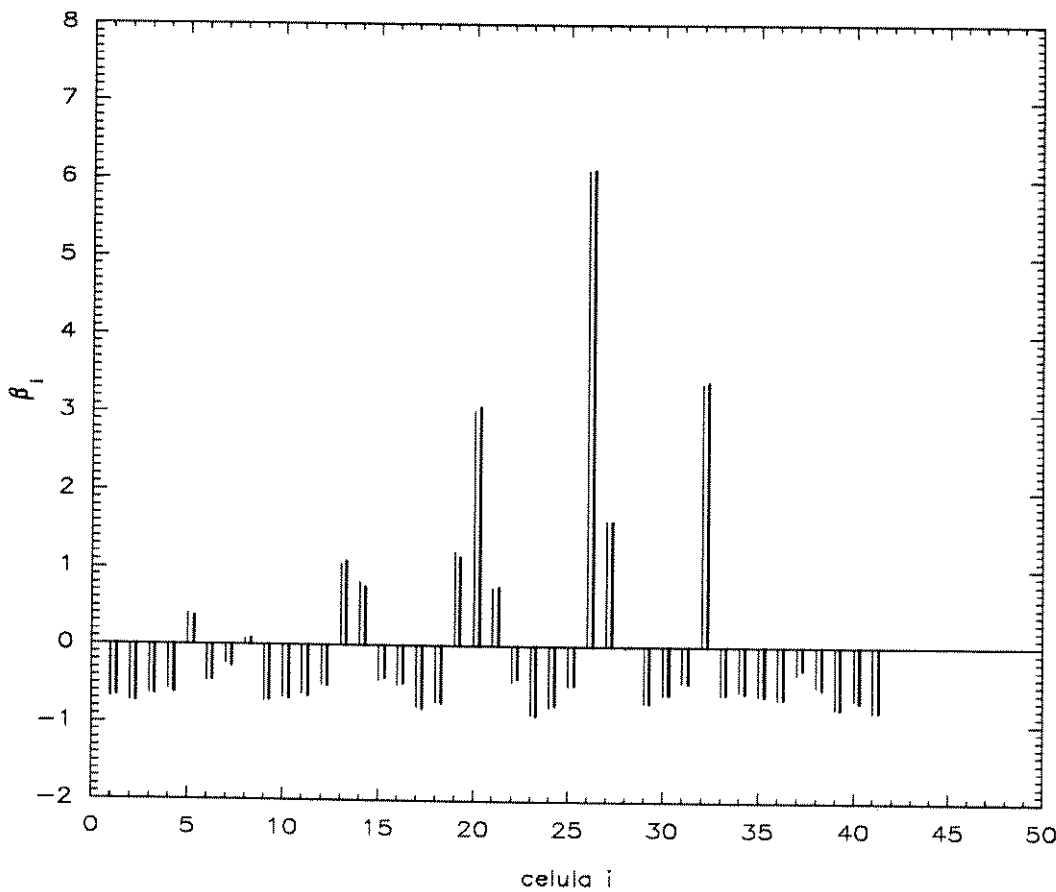


Figura 3.13: Desbalanceamento individual para o sistema real: teórico (linha fina) e simulado (linha cheia)

Observe que os desbalanceamentos individuais obtidos por simulação são muito próximos dos teóricos. O correspondente desbalanceamento do sistema é de $\beta = 0.2159897$ para o teórico, e de $\beta = 0.2169206$ para o simulado.

3.6 Sumário e Conclusões

No modelo de tráfego considerado há três tipos de chamadas: fixa para móvel, móvel para fixa, e móvel para móvel. Chamadas móveis para fixas e fixas para móveis requerem um canal bidirecional, enquanto que chamadas móveis para móveis necessitam de dois canais bidirecionais. A proporção de *tráfego-móvel-para móvel* para o *tráfego total* é muito pequena. Neste caso não ocorrerá um erro muito significativo se considerarmos o tráfego total como um processo de *nascimento e morte*, apesar da ocupação simultânea de dois canais bidirecionais para chamadas móveis para móveis.

Na geração de tráfego as chamadas bloqueadas são consideradas como perdidas, ou seja, quando uma ERB requisita um canal para uma nova chamada, mas não há canal disponível no CCC, a chamada é perdida. Por outro lado, quando a procura por um canal para a nova chamada é bem sucedida, estabelece-se a conexão com a rede fixa e esta duração é dada pela distribuição exponencial negativa. Desta forma, o tráfego gerado em cada célula pode ser visto como um processo de *Poisson* para a chegada de chamadas, sendo que a duração de chamadas segue uma distribuição exponencial negativa.

A necessidade de handoff será detectada tanto pela EM como pela ERB quando o nível do sinal do canal cair abaixo de um determinado valor. À medida que uma EM cruza a fronteira da célula, ela detecta a diminuição no nível do sinal e um processo de handoff pode ser iniciado. O pedido de handoff se processa através de repetidas tentativas durante um período de tempo programado.

Nos estudos de desempenho de tráfego deste trabalho são considerados três sistemas celulares de grande porte: sistema infinito balanceado, sistema infinito desbalanceado, e sistema real. O sistema infinito é reconhecidamente útil por fornecer resultados estatísticos bons. A utilização de sistemas infinitos balanceados e desbalanceados permite comparar

o efeito do desbalanceamento de tráfego no desempenho de tráfego dos algoritmos de alocação de canais. Um sistema real permite verificar a eficácia destes algoritmos na prática, para uma aplicação específica.

Foram definidos dois parâmetros de desempenho de tráfego: probabilidade de bloqueio médio e desbalanceamento de tráfego. A probabilidade de bloqueio constitui uma medida de largo uso em estudos de tráfego e é dada pela razão entre o tráfego bloqueado e o tráfego total. O desbalanceamento é uma proposta deste trabalho e constitui uma escala de 0 a 1 em que se avalia o nível de desbalanceamento de tráfego do sistema dados os desbalanceamentos individuais de cada célula. A probabilidade de bloqueio será usada para se avaliar o desempenho dos algoritmos de alocação de canais relativamente ao aumento da capacidade de tráfego do sistema. O desbalanceamento, por seu turno, avaliará a redistribuição de tráfego do sistema com a aplicação destes algoritmos.

Capítulo 4

Modelo de Tráfego Estendido

Este capítulo visa estender os conceitos apresentados no Capítulo 3 para sistemas celulares onde o acesso rádio a mais de uma estação base está presente.

A Seção 4.1 conjectura sobre o acesso rádio a mais de uma célula. A Seção 4.2 comenta sobre os benefícios potenciais do encaminhamento alternativo. A Seção 4.3 descreve os parâmetros de tráfego e medidas de desempenho estendidos para a situação mencionada. A Seção 4.4 delinea as principais conclusões deste capítulo.

4.1 Assinantes com Acesso a mais de uma Célula

Muitos aspectos de projetos de sistemas 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 à propagação de rádio ser variável, tanto em espaço como em tempo.

Se uma estação móvel encontra-se perto da fronteira entre duas células, ela poderá ter comunicação adequada com mais de uma célula. O primeiro passo na avaliação das técnicas de encaminhamento alternativo é estimar a proporção de tráfego flexível no sistema.

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. Conseqüentemente, para uma cobertura de pior caso deverá existir uma intersecção natural destas áreas servidas por estações base vizinhas, como mostrado na Figura 4.1.

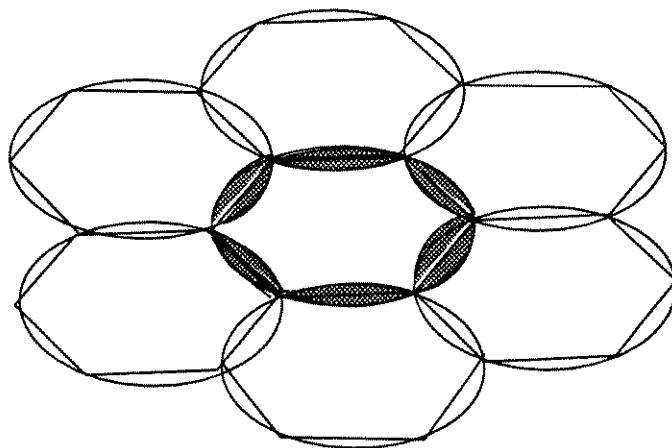


Figura 4.1: Intersecção das áreas de cobertura

Define-se γ como sendo a proporção da área de intersecção com seis estações base tomadas duas a duas, tal que

$$\gamma = \text{Área de intersecção} / \text{Área total da célula}$$

Através de cálculos simples, utilizando-se apenas a geometria mostrada na Figura 4.1, constata-se que γ é de aproximadamente 21%. Considerando que as estações móveis estão distribuídas uniformemente dentro das células, pode-se dizer que 21% dos assinantes estão dentro das fronteiras não definidas, com potencial de ser atendidos por ambas as estações base.

De fato, análises mais rigorosas [37, 38, 46, 47] mostram que, levando-se em conta as perdas de propagação e o desvanecimento de sinal, proporções superiores a 40% podem ser encontradas para tolerância entre caminhos de rádio às estações base vizinhas de 6 dB.

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

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

4.2 Benefícios Potenciais do Encaminhamento Alternativo

É possível intuir sobre os benefícios no desempenho de tráfego com o uso de encaminhamento alternativo. De fato, admitindo-se células com fronteiras rígidas o tráfego confinado em cada célula terá acesso apenas aos canais daquela célula. Agora, supondo-se células com fronteiras flexíveis, apenas parte do tráfego de cada célula será confinada à própria célula. Uma dada proporção do tráfego total poderá compartilhar recursos de outras células. Para um caso extremo, em que fronteiras não existam, não haverá tráfego confinado em nenhuma célula e todos os canais poderão ser compartilhados, o que, reconhecidamente através da fórmula *Erlang-B*, proporcionará uma probabilidade de bloqueio menor. Obviamente os casos extremos não se aplicam à realidade, porém servem de conjecturas a respeito da potencialidade da melhoria do desempenho de tráfego com o uso do encaminhamento alternativo. A maneira com que o tráfego flexível é manipulado vai, obviamente, influenciar o desempenho do sistema. Em particular, a técnica a ser explorada neste trabalho é a *Variação do Limiar de Bloqueio*, a ser descrita no Capítulo 5.

4.3 Parâmetros de Tráfego e Medidas de Desempenho

Ao contrário de outras redes de comunicação, onde o encaminhamento alternativo é uma prática usual, nos sistemas celulares não é possível supor que uma chamada bloqueada em uma célula possa ser automaticamente transferida para uma célula adjacente. Existe uma variável aleatória, função da propagação de rádio, que decide se uma chamada está ou não

apta para a transferência. Este trabalho trata isto como uma variável aleatória binária, independente entre chamadas sucessivas, cuja distribuição é definida por um parâmetro que descreve a probabilidade da chamada estar disponível para o encaminhamento alternativo.

4.3.1 Parâmetros

A estratégia de encaminhamento alternativo será analisada em função dos seguintes parâmetros:

- Tráfego total do sistema - A
- Proporção do tráfego flexível da célula i - γ_i
- Desbalanceamento do tráfego da célula i - β_i
- Número de canais da célula i - N_i
- Limiar de bloqueio da célula i - L_i

O tráfego total A será variado para que a performance da estratégia possa ser avaliada com a carga de tráfego. A proporção de tráfego flexível γ_i é uma função da qualidade de transmissão e fornece, em média, quantas chamadas por número total de chamadas no interior da célula i podem ser consideradas como tendo comunicação adequada com mais de uma estação base. O desbalanceamento de tráfego β_i fornece uma medida de quanto o tráfego da célula i desvia do tráfego médio. O número de canais N_i da célula i é inicialmente determinado como uma função do tráfego oferecido e da probabilidade de bloqueio requerida. O limiar de bloqueio L_i é um parâmetro de projeto escolhido como uma função de N_i , que indica o momento ou condição em que a estratégia de encaminhamento alternativo é empregada (o parâmetro L_i será detalhado no Capítulo 5).

4.3.2 Fluxos de Tráfego

Considere um sistema celular com n células. Para cada célula i , $i = 1, \dots, n$, uma chamada é identificada como pertencendo a um dos dois possíveis fluxos de tráfego:

- A_{φ_i} - tráfego fixo da célula i , originado no centro da célula i , e cursado via estação base i ou bloqueado.
- A_{γ_i} - tráfego flexível da célula i , originado suficientemente à borda da célula i para ser cursado via uma estação base i ou via alguma estação base vizinha.

O tráfego total A_i da célula i é dado por

$$A_i = A_{\varphi_i} + A_{\gamma_i} \quad (4.1)$$

Sabendo-se que

$$A_{\gamma_i} = \gamma_i A_i \quad (4.2)$$

Então

$$A_{\gamma_i} = \frac{\gamma_i}{1 - \gamma_i} A_{\varphi_i} \quad (4.3)$$

Considere que cada célula contribua com a mesma proporção $\gamma_i = \gamma$, $i = 1, \dots, n$ para o tráfego flexível do sistema. Deste modo

$$\sum_{i=1}^n A_{\varphi_i} = (1 - \gamma)A \quad (4.4)$$

Utilizando-se o conceito de tráfego médio e desbalanceamento de tráfego definido no Capítulo 3 vem

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i = \frac{1}{n}A \quad (4.5)$$

e

$$\beta_i = \frac{A_i - A_m}{A_m} \quad (4.6)$$

de onde

$$A_i = \frac{1}{n}A(1 + \beta_i) \quad (4.7)$$

Manipulando-se as equações acima obtém-se

$$A_{\varphi_i} = \frac{1}{n} A (1 - \gamma) (1 + \beta_i) \quad (4.8)$$

Da mesma forma

$$A_{\gamma_i} = \frac{1}{n} A \gamma (1 + \beta_i) \quad (4.9)$$

Seja b_i o número de células vizinhas tocando as bordas da célula i . Em um sistema infinito $b_i = 6$, mas $0 \leq b_i \leq 6$ para um sistema real. Considerando que o tráfego flexível da célula i esteja uniformemente distribuído entre as suas fronteiras, então o tráfego flexível para cada fronteira será A_{γ_i}/b_i . Definindo A_{ij} como o tráfego flexível disponível entre as células i e j , então

$$A_{ij} = \frac{A_{\gamma_i}}{b_i} + \frac{A_{\gamma_j}}{b_j} \quad (4.10)$$

Ou, equivalentemente

$$A_{ij} = \frac{1}{n} A \gamma \left(\frac{1 + \beta_i}{b_i} + \frac{1 + \beta_j}{b_j} \right) \quad (4.11)$$

4.3.3 Medidas de Desempenho

O desempenho do sistema será avaliado através da probabilidade média de bloqueio B_m e do desbalanceamento β . A probabilidade média de bloqueio é definida como a razão entre o tráfego bloqueado e o tráfego total. Assim

$$B_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_{\varphi_i} B_{\varphi_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b_i} A_{ij} B_{ij}}{A} \quad (4.12)$$

onde B_{φ_i} é a probabilidade de bloqueio do tráfego fixo A_{φ_i} e B_{ij} é a probabilidade de bloqueio do tráfego flexível A_{ij} .

Em termos dos parâmetros de tráfego definidos anteriormente

$$B_m = \frac{(1 - \gamma) \sum_{i=1}^n (1 + \beta_i) B_{\varphi_i} + \gamma \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{b_i} \left[\frac{1 + \beta_i}{b_i} + \frac{1 + \beta_j}{b_j} \right] B_{ij}}{n} \quad (4.13)$$

Relativamente ao desbalanceamento o cálculo é dado pela Equação 3.25 repetida aqui por conveniência:

$$\beta^2 \triangleq \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \beta_i^2 \quad (4.14)$$

Vale salientar que o desbalanceamento individual β_i utilizado na Equação 4.14 é obtido através do tráfego escoado, como proposto na Seção 3.4.

4.4 Sumário e Conclusões

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 à propagação de rádio ser variável, tanto em espaço como em tempo. Se uma estação móvel encontra-se perto da fronteira entre duas células, ela poderá ter comunicação adequada com mais de uma célula.

Desta forma o tráfego total de uma célula compreende uma porção com acesso rádio somente a sua própria estação rádio base e outra porção com acesso a mais de uma estação rádio base. Nos estudos de desempenho o modelo de tráfego utilizado deve então ser estendido de forma a contemplar esta situação. Em particular, para sistemas com número finito de células - característica dos sistemas reais -, onde as células mais externas são circundadas por um número inferior a seis células, o efeito das bordas deve ser levado em consideração na modelagem do tráfego flexível das células envolvidas.

Os parâmetros de tráfego considerados são aqueles mesmos descritos no Capítulo 3 acrescidos da proporção de tráfego flexível e do limiar de bloqueio. O desempenho do sistema será avaliado através da probabilidade de bloqueio e do desbalanceamento.

Capítulo 5

Variação do Limiar de Bloqueio e Rearranjo de Chamadas

A técnica *Variação do Limiar de Bloqueio (VLB)* foi inicialmente proposta em [39], onde o objetivo era a análise qualitativa dos fenômenos esperados quando da aplicação desta estratégia numa rede celular. Com este fim, um sistema simples de duas células foi considerado e a análise feita através da cadeia de *Markov*. A análise através de um sistema de duas células é, sem dúvida, bastante limitada já que em sistemas práticos várias células interagem e outros fenômenos, além das chamadas puras, ocorrem. A extensão da VLB para aplicação em sistemas de grande porte foi então proposta e largamente explorada em [8] onde, através de simulação, os sistemas *Ideal Infinito* e *Real* foram investigados, incluindo-se aí o fenômeno de handoff.

O objetivo deste capítulo é proceder à análise levada a cabo em [8], incluindo-se nela uma proposta de *Rearranjo de Chamadas* em que a própria VLB será usada. Como será visto adiante, esta nova proposta implica em se tratar chamadas fixas e flexíveis da mesma forma, fazendo-se, assim, um uso completo da VLB otimizando-se ainda mais a ocupação dos canais.

A Seção 5.1 descreve em detalhe a técnica da *Variação do Limiar de Bloqueio*. A Seção 5.2 propõe uma técnica de rearranjo de chamadas aplicando-se a *VLB*. A Seção 5.3 mostra os resultados obtidos, através de simulação, quando as duas técnicas são aplicadas

para um sistema ideal balanceado, sistema ideal desbalanceado, e sistema real.

5.1 Variação do Limiar de Bloqueio (VLB)

As fronteiras entre as células não são bem definidas, e suas áreas de cobertura sobrepõem-se em alguns pontos. A sobreposição de áreas de cobertura permite o surgimento de tráfego flexível que, manipulado de maneira adequada através de algoritmos de encaminhamento alternativo, pode melhorar substancialmente o grau de serviço do sistema.

Seja um sistema de duas células adjacentes como mostrado na Figura 5.1.

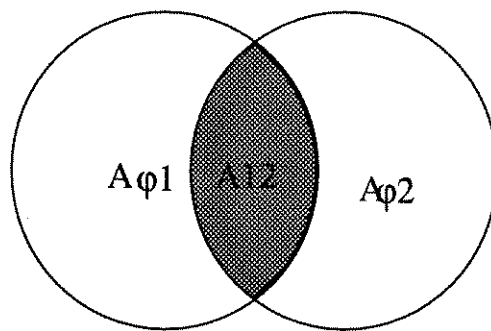


Figura 5.1: Tipos de tráfego

Considerando-se o acesso a apenas duas estações base de células adjacentes 1 e 2, o tráfego total oferecido pode ser dividido em três fluxos:

- Tráfego fixo da célula 1 (A_{φ_1}).
- Tráfego fixo da célula 2 (A_{φ_2}).
- Tráfego alternativo ou flexível (A_{12}).

O tráfego fixo é gerado pelas estações móveis que têm boa comunicação somente com a estação base da célula 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 estações base de ambas as células, e que pode ser escoado por qualquer uma delas, dependendo da sua condição de ocupação de canais e das estatísticas do comportamento de tráfego, conforme o critério de encaminhamento adotado.

Neste capítulo analisa-se o algoritmo da Variação do Limiar de Bloqueio (VLB) [8] aplicada ao 1) Sistema Infinito Balanceado, 2) Sistema Infinito Desbalanceado, e 3) Sistema Real. O objetivo é verificar o desempenho destes sistemas com a inclusão do rearranjo de chamadas em que a própria VLB será utilizada, sendo esta uma das propostas deste trabalho.

A Variação do Limiar de Bloqueio, tanto quanto a *Directed Retry* [9], divide as células, com as quais as estações móveis situadas na região de tráfego flexível podem-se comunicar, 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 *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 mais eficientemente os recursos disponíveis, i.e., os canais da célula de segunda opção. Considere cada célula do sistema com N_i canais. Define-se o parâmetro L_i , inteiro e não negativo, como o limiar de bloqueio com que a célula i operará. O limiar de bloqueio L_i indica o ponto a partir do qual a célula de primeira opção com L_i 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 para esta célula. Do contrário, a chamada deverá permanecer na célula de origem.

Para $L_i > N_i \forall i$ 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, já que as células estão isoladas umas das outras.

Para $L_i = N_i$ 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_i até zero pode-se verificar o desempenho do sistema de acordo com os vários parâmetros envolvidos. Em particular para $L_i = 0 \forall i$ a estratégia consiste em enviar o tráfego flexível para a célula com menor número de canais ocupados. 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 passem à condição de flexíveis aumentando-se a disponibilidade de canais livres para as chamadas da região de tráfego fixo [48, 49].

A técnica do rearranjo de chamadas será detalhada a seguir.

5.2 Rearranjo

As técnicas locais de alocação identificam as novas chamadas como flexíveis no momento do estabelecimento da chamada. Entretanto, uma chamada, já em progresso, que tenha sido identificada como flexível e pertencendo a uma determinada célula, é susceptível de ser transferida para outra célula para que uma chamada não flexível, ocorrendo na primeira célula, possa ser acomodada. Isto caracteriza o procedimento de rearranjo de chamada, permitindo ao sistema ser mais adaptável a variações do perfil de tráfego, aumentando a capacidade do sistema.

O rearranjo é particularmente útil para as células cujas chamadas fixas poderão estar bloqueadas. Entretanto, o rearranjo pode ser aplicado antes que a célula atinja a condição de bloqueio, ou seja, sempre que o número de canais ocupados da célula i exceder o seu limiar L_i . Portanto, na chegada de uma chamada, seja ela *flexível* ou *fixa*, a VLB pode

ser utilizada. No primeiro caso, o atendimento da chamada é feito numa única etapa empregando-se a *VLB*, como já explorado. No segundo caso, o atendimento da chamada envolve duas etapas: a primeira com a aplicação da *VLB* para liberar o canal flexível e a segunda para ocupar este canal pela chamada fixa.

A fim de ilustrar o rearranjo considere um sistema de duas células com $N_i = 3$ canais em cada uma delas. Admita que as células estejam operando com um valor de limiar $L_i = 3$. Suponha que num determinado instante a *célula 1* esteja com todos os seus canais ocupados e a *célula 2* esteja com dois canais ocupados. Além disso, considere que cada célula esteja com um canal ocupado na região de sobreposição entre as duas células, onde os assinantes podem ter uma comunicação adequada com ambas as estações base.

Suponha agora que uma nova chamada surja em uma célula tal que, devido ao critério da qualidade de transmissão, somente a *célula 1* possa servir esta chamada. Em outras palavras, a respectiva chamada não está na região de sobreposição entre as duas células. Em circunstâncias normais esta chamada seria perdida, a menos que um rearranjo de chamada fosse feito.

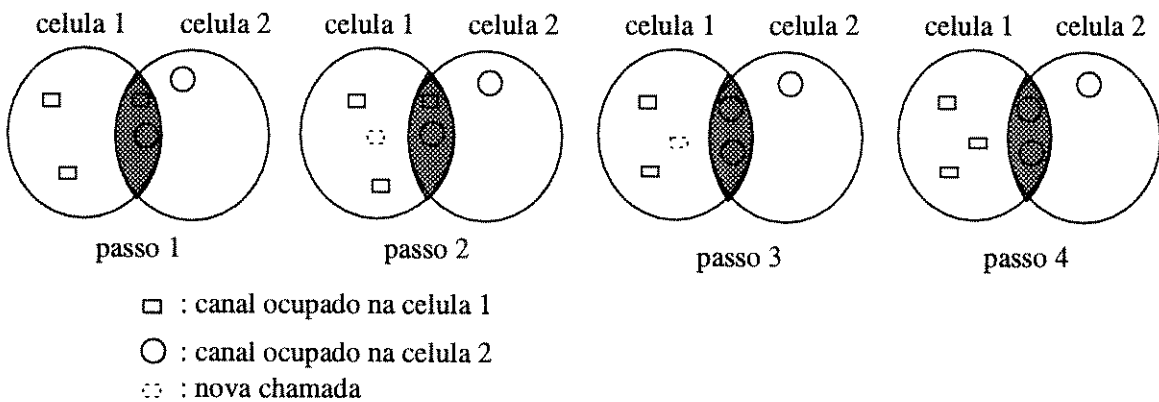


Figura 5.2: Passos no procedimento de rearranjo de chamada. Cada célula possui três canais.

O processo de rearranjo está ilustrado na Figura 5.2 com os correspondentes passos descritos a seguir:

- **passo 1:** a *célula 1* atende três chamadas e uma delas está dentro da área de

sobreposição entre as duas células; a célula 2 atende duas chamadas e uma delas está dentro da área de sobreposição entre as duas células.

- **passo 2:** uma nova chamada acontece dentro da célula 1 e não pode ser atendida por nenhuma das duas células.
- **passo 3:** a chamada flexível da célula 1 libera o seu canal e utiliza o canal da célula 2.
- **passo 4:** o canal liberado é agora usado pela nova chamada da célula 1.

Aplicando-se as mesmas regras de decisão da *VLB* o procedimento de rearranjo pode ser feito mais cedo, i.e., antes que a célula atinja a sua condição de bloqueio. Isto é ditado pelo valor de limiar, um parâmetro de projeto, implementado no software de controle de chamada, que pode ser convenientemente escolhido.

5.3 Resultados

O algoritmo da Variação do Limiar de Bloqueio foi aplicado a diversos sistemas com diferentes distribuições de tráfego e o desempenho avaliado através de simulação. Em particular os sistemas de interesse são: Sistema Infinito Balanceado, Sistema Infinito Desbalanceado, e Sistema Real.

Os resultados foram validados simulando-se situações especiais, através da manipulação de parâmetros, em que o bloqueio médio pode ser calculado através da fórmula *Erlang-B*. Estas situações incluem os seguintes casos:

1. $L_i > N_i \forall i$; neste caso, apesar da existência do tráfego flexível, o algoritmo *VLB* não é aplicado já que a célula de segunda opção nunca será testada.
2. $\gamma = 0$; neste caso o sistema não reconhece a existência de chamadas flexíveis, e as células são vistas como isoladas umas das outras.

Ambas as situações coincidem com a alocação fixa de canais em que o bloqueio médio Bm é dado por

$$Bm = \frac{\sum_{i=1}^n A_i E[A_i, N_i]}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5.1)$$

onde A_i é o tráfego total na célula i , N_i é o número de canais da célula i , n é o número de células do sistema, e $E[.,.]$ é a fórmula *Erlang-B*. Além disso simulou-se também um sistema de $n = 2$ células em que, para $\gamma = 1$, a probabilidade de bloqueio pode ser obtida pela fórmula *Erlang-B*. Neste caso ambas as células são consideradas como uma única célula e

$$Bm = E[A_1 + A_2, N_1 + N_2] \quad (5.2)$$

Nesta seção mostraremos alguns resultados da probabilidade do bloqueio médio como uma função da flexibilidade para uma dada carga de tráfego, e como função da carga de tráfego para uma dada flexibilidade. O parâmetro de desbalanceamento é calculado para alguns casos.

5.3.1 Bloqueio Médio Versus Flexibilidade

A Figura 5.3 mostra o bloqueio versus flexibilidade para o sistema infinito balanceado onde um tráfego de 1,5 vezes o tráfego inicial foi considerado.

O bloqueio médio é obviamente insensível à variação de γ se $L_i > N_i \forall i$. Neste caso as chamadas flexíveis são atendidas pelas suas próprias células e a estratégia coincide com o algoritmo da alocação fixa, onde o bloqueio médio é dada pela fórmula *Erlang-B*. Note que, com o uso da estratégia, à medida que L_i decresce e γ aumenta uma substancial melhora é atingida quanto ao bloqueio médio do sistema. Observamos que a melhora é notadamente mais significativa quando L_i varia de $N_i + 1$ para $N_i \forall i$, quando a *VLB* e a *Directed Retry* são coincidentes. Por outro lado, para um determinado γ , à medida que L_i diminui, o bloqueio médio diminui progressivamente atingindo seu mínimo para $L_i = 0$. Neste caso o bloqueio médio é significativamente menor do que aquele obtido quando $L_i = N_i \forall i$ (*Directed Retry*). Note, entretanto, que para $L_i < N_i - 3$ (neste exemplo, $N_i - 3 = 12$, i.e. $L_i = 80\%N_i$) os valores das probabilidades do bloqueio médio são muito próximos.

Portanto, em termos práticos, células operando com um limiar de bloqueio menor do que $N_i - 3$ ($80\%N_i$) oferece quase o mesmo desempenho. Todas estas observações são válidas para quando há chamada sem rearranjo e para quando a chamada com rearranjo é implementada. Agora se a chamada com rearranjo é considerada a melhora é bem mais significativa.

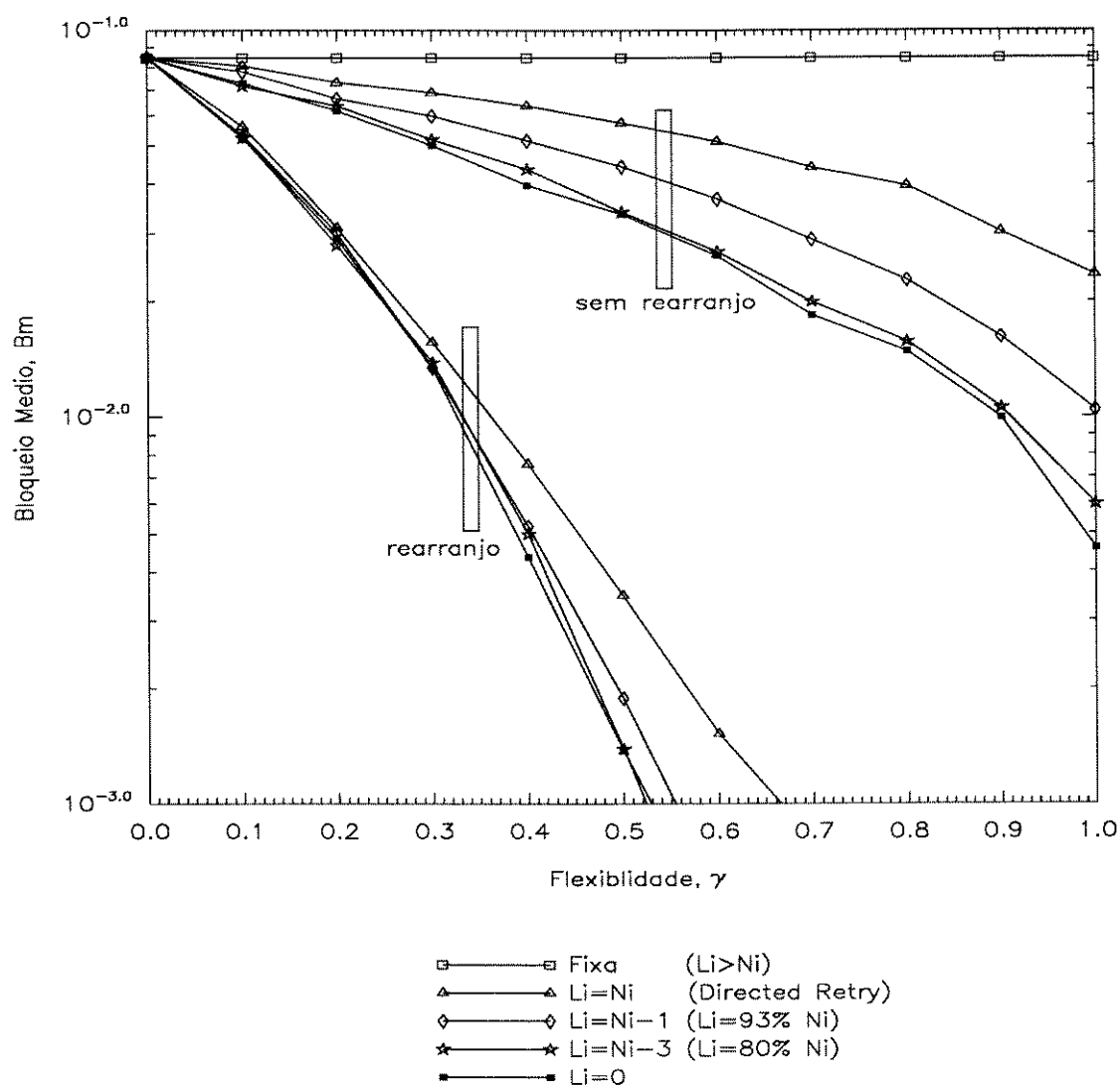


Figura 5.3: Bloqueio médio versus flexibilidade: sistema infinito balanceado

A Figura 5.4 mostra os resultados para um sistema infinito desbalanceado onde consideramos um tráfego 1,6 vezes o tráfego inicial mostrado na Figura 3.12.

Note um comportamento semelhante ao do sistema balanceado. Note ainda que para

este sistema os ganhos na condição sem rearranjo são maiores do que aqueles experimentados pelo sistema balanceado na mesma condição. Por outro lado os efeitos do rearranjo são mais sentidos no sistema balanceado.

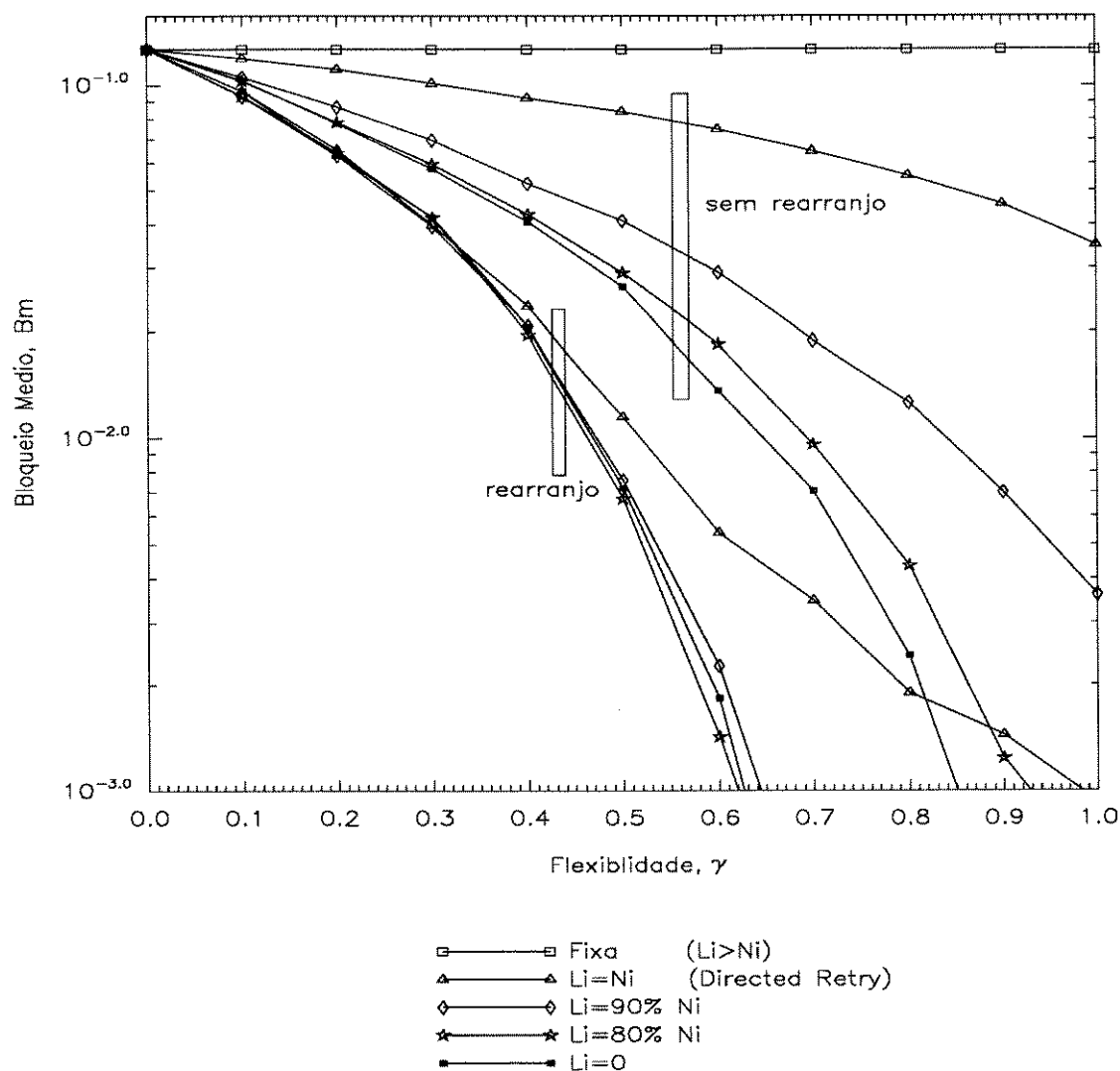


Figura 5.4: Bloqueio médio versus flexibilidade: sistema infinito desbalanceado

A Figura 5.5 mostra os resultados para o sistema real onde consideramos um tráfego 1,6 vezes o tráfego inicial mostrado na Figura 3.14. Um comportamento similar àquele apresentado para o sistema infinito pode ser notado no sistema real.

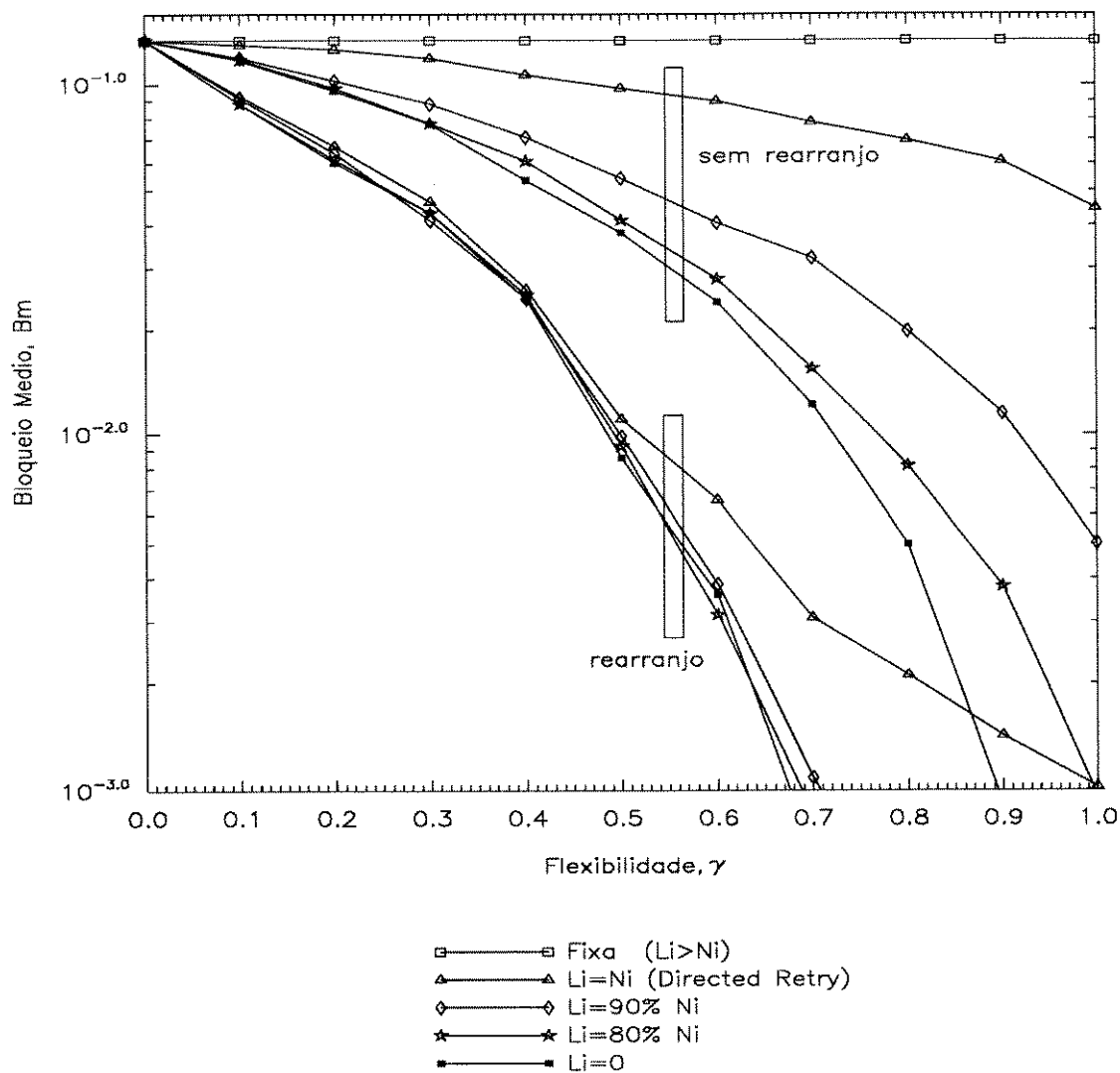


Figura 5.5: Bloqueio médio versus flexibilidade: sistema real

A Tabela 5.1 mostra a evolução do desbalanceamento com o aumento da flexibilidade para um valor de limiar $L_i = 0$ para os três sistemas.

Note que, em média, os sistemas, em geral, tendem a uma melhora na condição de balanceamento com o aumento da flexibilidade.

flexibilidade (γ)	Sistema Infinito Balanceado		Sistema Infinito Desbalanceado		Sistema Real	
	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)
0.0	0.002255	0.002255	0.1594352	0.1594352	0.188963	0.188963
0.1	0.002123	0.002130	0.1531435	0.1540860	0.180442	0.181786
0.2	0.001434	0.001343	0.1477406	0.1493521	0.174333	0.176045
0.3	0.001441	0.001082	0.1444293	0.1461425	0.169719	0.171002
0.4	0.001241	0.000943	0.1416536	0.1418858	0.163817	0.166200
0.5	0.001032	0.000864	0.1391759	0.1389773	0.160782	0.160809
0.6	0.000841	0.000748	0.1365769	0.1364865	0.156888	0.156212
0.7	0.000728	0.000566	0.1349653	0.1345975	0.153485	0.152262
0.8	0.001004	0.000630	0.1334096	0.1327264	0.149185	0.148254
0.9	0.000726	0.000566	0.1320348	0.1317067	0.148091	0.146171
1.0	0.000690	0.000708	0.1310080	0.1310884	0.145877	0.145374

Tabela 5.1: Evolução do desbalanceamento com o aumento da flexibilidade, onde VLBR é a Variação do Limiar de Bloqueio com Rearranjo.

5.3.2 Bloqueio Médio Versus Tráfego

A Figura 5.6 mostra o bloqueio médio versus tráfego normalizado para o sistema infinito balanceado onde uma flexibilidade de 40% foi considerada.

A curva superior ($L_i > N_i \forall i$) corresponde ao caso em que a VLB e o algoritmo da alocação fixa são coincidentes e a fórmula *Erlang-B* se aplica. Com o uso da estratégia ($0 \leq L_i \leq N_i$) um substancial ganho de tráfego pode ser observado com o seu máximo atingido para $L_i = 0$. Aqui também é evidente o fato de que não há muita melhora quando L_i varia de $L_i = N_i - 3$ ($L_i = 80\%N_i$) até zero. Deve-se enfatizar, entretanto, que

para estes casos a melhora no desempenho de tráfego é mais significativa do que aquela atingida para limiares superiores (incluindo-se aí o caso Directed Retry). Novamente o uso de rearranjo de chamada possibilita uma maior flexibilidade para o sistema acarretando um aumento na capacidade de tráfego.

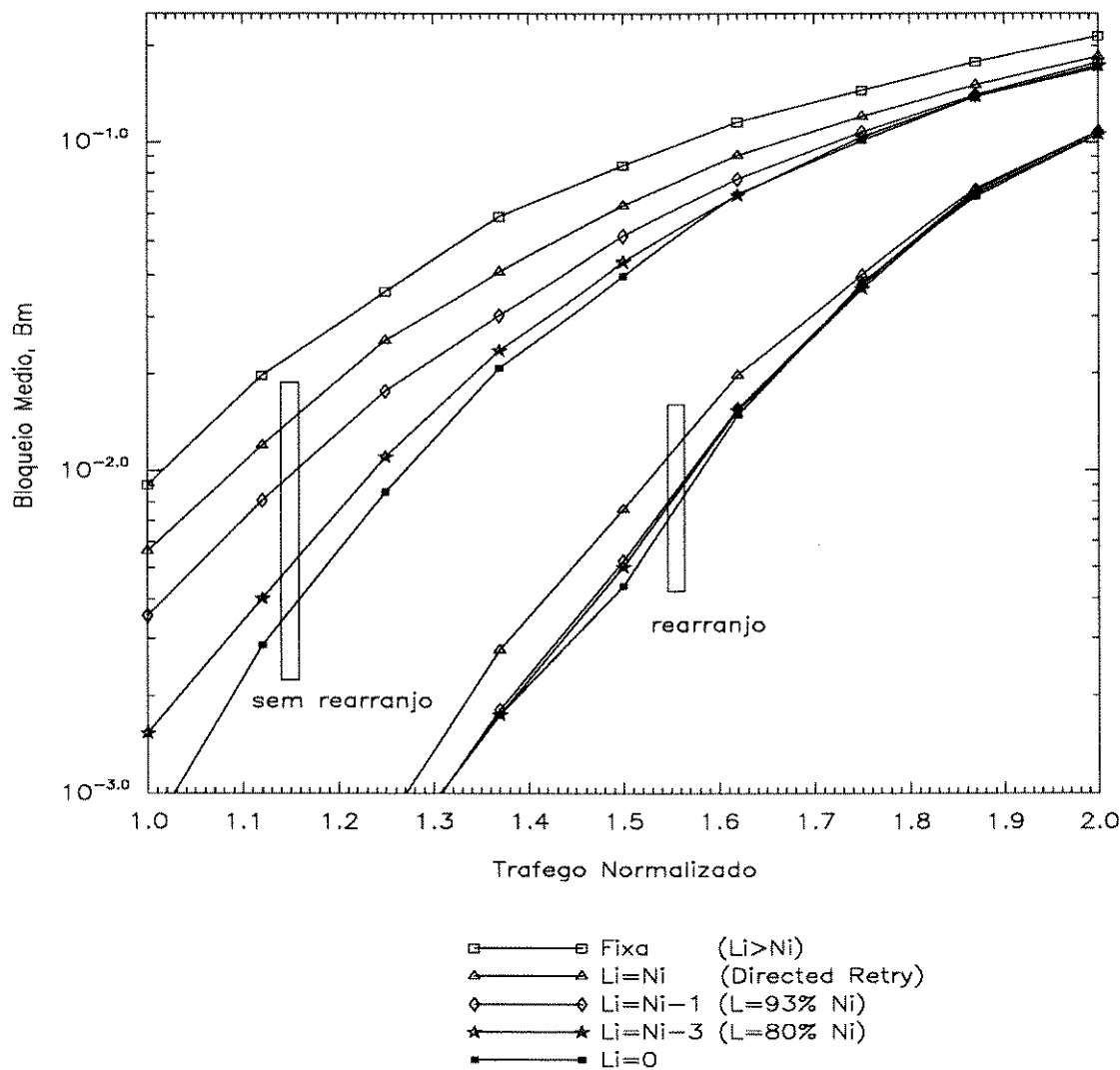


Figura 5.6: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: sistema infinito balanceado

A Figura 5.7 mostra os resultados para o sistema infinito desbalanceado onde observa-se um comportamento semelhante ao sistema balanceado.

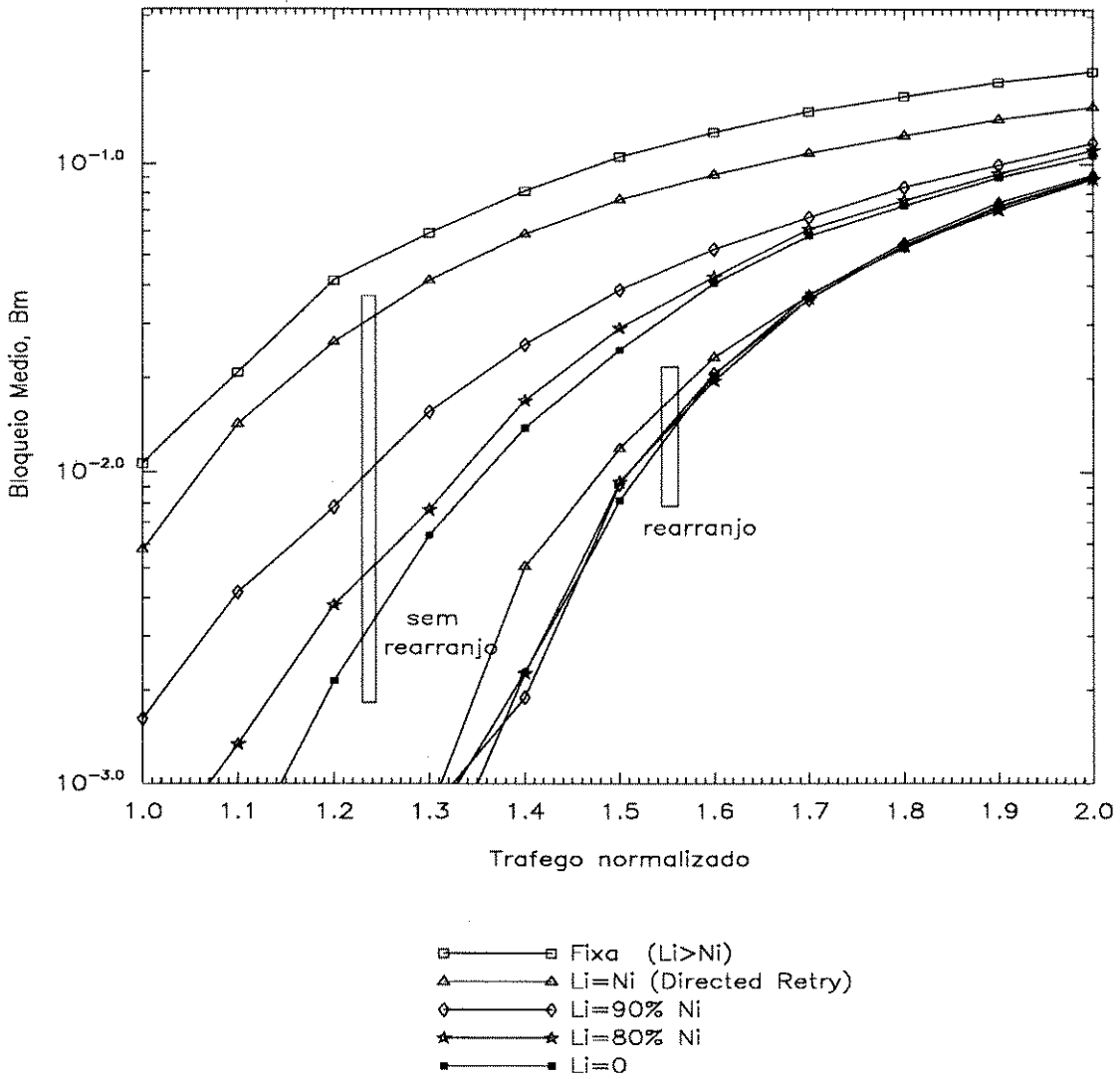


Figura 5.7: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: sistema infinito desbalanceado

Analogamente, a Figura 5.8 mostra os resultados para o sistema real. As mesmas observações citadas anteriormente também são válidas aqui.

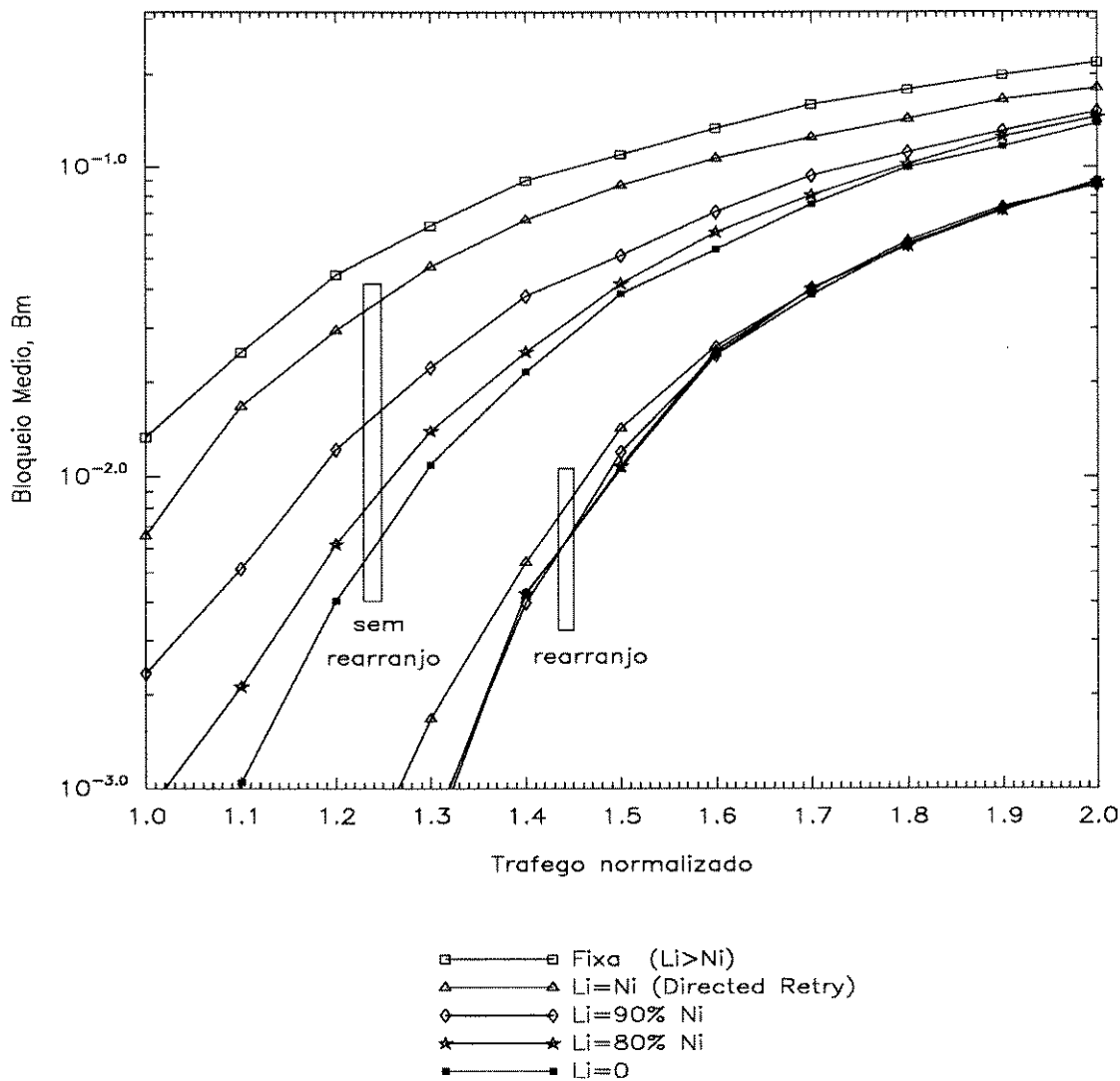


Figura 5.8: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: sistema real

A Tabela 5.2 mostra a evolução do desbalanceamento com o aumento do tráfego para uma flexibilidade de 40% e um valor de limiar $L_i = 0$ para os três sistemas.

Note que, em média, os sistemas tendem a uma melhora na condição de balanceamento com o aumento do tráfego.

tráfego normalizado (A)	Sistema Infinito Balanceado		Sistema Infinito Desbalanceado		Sistema Real	
	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)
1.0	0.001941	0.001665	0.1693084	0.1692322	0.193354	0.193392
1.1	0.002056	0.001703	0.1623218	0.1628001	0.188484	0.186937
1.2	0.001986	0.001369	0.1578251	0.1572035	0.183862	0.181431
1.3	0.001711	0.001209	0.1544898	0.1530452	0.178929	0.176400
1.4	0.001316	0.001205	0.1494927	0.1487941	0.173938	0.174655
1.5	0.001241	0.000943	0.1454600	0.1449778	0.169535	0.169423
1.6	0.001336	0.000896	0.1416536	0.1418858	0.163817	0.166200
1.7	0.000996	0.001044	0.1374780	0.1382837	0.159633	0.161944
1.8	0.000799	0.000754	0.1339852	0.1347717	0.155738	0.157277
1.9	0.000789	0.000489	0.1301989	0.1309853	0.151531	0.153413
2.0	0.000770	0.000635	0.1263678	0.1275810	0.147007	0.148972

Tabela 5.2: Evolução do desbalanceamento com o aumento do tráfego

5.4 Sumário e Conclusões

Varição do Limiar de Bloqueio (*VLB*), uma estratégia que utiliza o tráfego com rádio acesso a mais de uma estação base, foi investigada. Consideraram-se três sistemas celulares: infinito balanceado, infinito desbalanceado, e real. A *VLB* pode ser considerada como uma generalização da técnica Directed Retry [9]. Na *VLB* a decisão para desviar a chamada flexível para a célula de segunda opção é baseada no valor de limiar L_i da célula i , positivo e inteiro, escolhido como um parâmetro de projeto. Chamadas flexíveis são desviadas para fora da célula de primeira opção no caso em que o número de canais ocupados exceder o limiar L_i da célula i e a célula de segunda opção estiver com mais

canais livres. O rearranjo de chamadas foi implementado e os procedimentos, quanto à decisão, foram baseados também na estratégia VLB. Portanto, a estratégia é aplicada sempre que uma chamada surge, seja ela flexível ou não.

Observou-se que o uso da estratégia aumenta substancialmente a capacidade de tráfego do sistema. Quanto menor o limiar L_i menor a probabilidade de bloqueio, com seu mínimo atingido em $L_i = 0 \forall i$. Entretanto, em termos práticos, sistemas onde as células operam com um limiar tão alto quanto $80\%N_i$, onde N_i é o número de canais na célula i , fornecem uma performance muito semelhante àquela obtida pelos sistemas onde o limiar é igual a zero. Um limiar zero simplifica o procedimento de encaminhamento alternativo, com um parâmetro a menos a ser considerado. Em tais casos, entretanto, em média, os níveis de interferência experimentados pelos usuários aumentarão em decorrência da permissão de mais chamadas empregando canais com qualidade de transmissão próximo do nível crítico. Um limiar alto manteria as chamadas flexíveis dentro das suas próprias células, e uma melhor qualidade de transmissão seria experimentada.

O uso do rearranjo de chamadas utilizando também as regras de decisão da técnica Variação do Limiar de Bloqueio provou ser bastante eficaz, dando um ganho de tráfego substancial.

É interessante observar que, em geral, o comportamento dos sistemas considerados, quando da aplicação da Variação do Limiar de Bloqueio, é bastante semelhante. Nota-se, no entanto, que os ganhos na condição sem rearranjo são maiores para os sistemas desbalanceados, enquanto que os efeitos do rearranjo são mais sentidos no sistema balanceado.

Capítulo 6

Técnicas Globais e Locais Combinadas

Como já mencionado no Capítulo 2, as investigações concentram-se em dois grupos básicos de técnicas: Técnicas Globais de Alocação (*TGA*) e Técnicas Locais de Alocação (*TLA*), com mais ênfase às primeiras. De fato, o desempenho destas técnicas é avaliado dentro do próprio grupo a que pertencem e nenhuma, ou pouca, preocupação existe em se comparar técnicas pertencendo a grupos diferentes. O máximo que tem-se permitido é uma sutil avaliação da complexidade, das vantagens e desvantagens, da implementação de uma ou outra técnica pertencendo a grupos diferentes. Sem dúvida a abordagem das técnicas de um ou outro grupo é bem diversa levando-se a uma falsa concepção de exclusividade, isto é, onde se decide por uma automaticamente se exclui a outra.

Neste Capítulo propõe-se a combinação de Técnicas Globais de Alocação e Técnicas Locais de Alocação. Constata-se que todos os algoritmos pertencendo ao grupo *TGA* podem ser combinados com aqueles pertencendo a grupo *TLA* e vice-versa.

Para os algoritmos em *TGA* em que uma porção dos canais é alocada de maneira fixa e a outra de maneira dinâmica os algoritmos em *TLA* podem ser aplicados diretamente à porção fixa. Caso a porção fixa seja nula os algoritmos em *TLA* podem ser aplicados visando os canais impedidos. Neste caso, um canal estando impedido em uma célula poderá ser utilizado na célula vizinha para estações móveis próximos à fronteira de ambas

as células. Obviamente esta última estratégia pode ser combinada com a primeira. Em particular, neste trabalho de tese será considerada apenas a combinação sem se levar em conta os canais impedidos, sendo esta uma proposta de prosseguimento do trabalho.

O desempenho da técnica combinada poderá então ser avaliado em função da flexibilidade (proporção da área de sobreposição) e também do tráfego. Note que para flexibilidade nula a técnica combinada coincidirá com o algoritmo em *TGA* original. O mesmo raciocínio aplica-se para um limiar superior ao número de canais da célula. Da mesma forma, parâmetros das técnicas em *TGA* podem ser manipulados de forma que o efeito global da combinação seja aquele da técnica local apenas. Por exemplo, a relação *canais dinâmicos/canais fixos* pode ser feita igual a zero ou número de canais permitido para empréstimo pode ser feito nulo.

Dos algoritmos em *TGA* selecionou-se a Variação do Limiar de Bloqueio (*VLB*) por ser o mais abrangente e por ser objeto de investigação deste trabalho de tese. Dos algoritmos em *TGA* selecionaram-se os mais significativos, quais sejam, Alocação por Empréstimo de Canais (*AEC*), Alocação Híbrida de Canais (*AHC*), e *Channel Borrowing Without Locking* (*CBWL*). A combinação deverá ser feita levando-se ou não em conta o rearranjo de chamadas aplicado em ambas as técnicas combinadas.

A Seção 6.1 descreve a combinação *VLB* e *AEC*. A Seção 6.2 apresenta a combinação *VLB* e *AHC*. A Seção 6.3 apresenta a combinação *VLB* e *CBWL*. A Seção 6.4 apresenta a validação do modelo utilizado. A Seção 6.5 mostra os resultados obtidos, através de simulação, quando as combinações são aplicadas a um sistema real. Como visto no Capítulo 5 o desempenho das técnicas de alocação, tanto no Sistema Ideal Balanceado como no Sistema Ideal Desbalanceado, se assemelha àquele do Sistema Real.

6.1 Alocação por Empréstimo de Canais e Variação do Limiar de Bloqueio: AEC-VLB

Dentre as várias técnicas de alocação de canais por empréstimo descritas no Capítulo 2 selecionou-se o *Algoritmo I* de Anderson [21] por ser simples e eficiente. Este algoritmo baseia-se no conceito de *canais nominais*¹. Quando há uma nova chamada e os *canais nominais* estão todos ocupados, é feita uma tentativa de empréstimo de canal de alguma célula adjacente. Se houver duas ou mais células adjacentes que tenham canais disponíveis para empréstimo, o canal é escolhido daquela que possuir a maior quantidade de canais livres.

Utilizou-se também a estratégia de rearranjo de Elnoubi, Singh, e Gupta [22] para diminuir o tráfego dos canais de empréstimo. Quando uma chamada atendida por um canal de empréstimo termina, o canal é liberado do impedimento da célula adjacente que fez o empréstimo e das duas co-células mais próximas. Quando uma chamada atendida por um canal nominal termina e existe uma chamada em progresso sendo atendida por um canal de empréstimo dentro da mesma célula, a segunda chamada é rearranjada para o canal nominal e o canal de empréstimo é liberado para uso nas três co-células. A Variação do Limiar de Bloqueio é então aplicada aos demais canais da célula não usados para empréstimo.

6.2 Alocação Híbrida de Canais e Variação do Limiar de Bloqueio: AHC-VLB

Na alocação híbrida de canais uma parte dos canais da célula é pré-alocada de forma fixa, e o restante dos canais é alocado de forma dinâmica de acordo com o comportamento do tráfego. Por exemplo, numa área de serviço com T canais, dividimos os canais em dois conjuntos disjuntos A e B , não necessariamente com o mesmo número de elementos.

¹Canais nominais são os canais alocados à célula quando da divisão de frequências no sistema.

O conjunto A contém os canais utilizados na alocação fixa e o conjunto B os canais da alocação dinâmica. O desempenho desta técnica depende tanto da *distribuição de tráfego* como relação de *canais fixos/ canais dinâmicos*. A alocação dinâmica utilizada foi o *FA (First Available)* [26].

O rearranjo também foi implementado para diminuir o tráfego dos canais dinâmicos. Quando uma chamada atendida por um canal fixo termina e existe uma chamada em progresso sendo atendida por um canal dinâmico dentro da mesma célula, a segunda chamada é rearranjada para o canal fixo e o canal dinâmico é liberado para uso nas células adjacentes. Desta forma otimiza-se a utilização dos canais fixos, que estão sempre na distância mínima de reuso, e disponibiliza-se uma quantidade maior de canais dinâmicos para aquelas células onde não há mais canais fixos livres. A Variação do Limiar de Bloqueio é então aplicada à porção fixa dos canais disponíveis.

6.3 Channel Borrowing Without Locking e Variação do Limiar de Bloqueio: CBWL-VLB

Channel Borrowing Without Locking (CBWL) pertence à classe dos algoritmos de alocação por empréstimo de canais. A aplicação destes algoritmos implica a mudança temporária do padrão de reuso dos canais. Nos algoritmos convencionais, uma vez consumado o empréstimo, os co-canais das células mais próximas estarão impedidos de uso por questões de interferência. Em *CBWL* este impedimento é evitado baixando-se convenientemente a potência do sinal, como já detalhado no Capítulo 2.

Neste trabalho propõe-se a aplicação da Variação do Limiar de Bloqueio antes da aplicação do *CBWL*. Em outras palavras, *CBWL* será utilizado somente na eventualidade da *VLB* não conseguir atender uma nova chamada.

Por conveniência, rememora-se a seguir a técnica *CBWL* com o objetivo de fazê-lo adaptável ao sistema sob investigação. O empréstimo de canal pode ser feito somente pelas células adjacentes. O canal emprestado não pode ser usado pela célula responsável

6.3. CHANNEL BORROWING WITHOUT LOCKING E VARIAÇÃO DO LIMAR DE BLOQUEIO

pelo empréstimo, mas pode ainda ser utilizado por quaisquer das co-células mais próximas. Assim não há impedimento de canal. Com o objetivo de evitar o aumento da interferência co-canal, a potência de transmissão dos canais emprestados é reduzida. Portanto, eles podem ser acessados somente em uma parte da célula que pede o empréstimo. Para se determinar se uma estação móvel está na região que pode ser atendida por um canal de empréstimo, cada célula transmite um sinal cuja potência (reduzida) é a mesma da potência do canal de empréstimo. O sinal é denominado *borrowed channel sensing signal* (BCSS). Se o BCSS não estiver acima de um limiar na estação móvel, o empréstimo de canal não pode ser usado pela estação móvel. Células vizinhas são identificadas da seguinte maneira. Com respeito a uma dada célula, escolhe-se a primeira célula adjacente. A posição da célula adjacente pode ser arbitrária mas uma vez escolhida, todas as demais células adjacentes serão numeradas sequencialmente no sentido horário a partir da primeira. A célula v em questão é denominada célula 0 . Seja $C(v)$ o número de canais da célula v . Os $C(v)$ canais da célula são divididos em sete grupos distintos. Cada grupo possui $C(v)_i$ ($i = 0, 1, \dots, 6$) canais. Os canais do grupo 0 são reservados para uso exclusivo da célula v . Nos seis grupos restantes, os canais podem ser emprestados para as células adjacentes. A i -ésima célula adjacente só pode ter o empréstimo do i -ésimo grupo. Por conveniência, consideramos um arranjo simétrico com $C(v)_1 = C(v)_2 = \dots = C(v)_6 = l_v$ onde $l_v = C(v) \text{ MOD } 7$ e $C(v)_0 = C(v) - 6l_v$. O sistema real da Figura 3.11 acrescido da estrutura e canal do CBWL é mostrado na Figura 6.1.

O CBWL, com a estrutura descrita na Figura 6.1, possui as seguintes vantagens:

- Na estrutura, uma célula não necessita transmitir e receber todos os canais das suas células vizinhas. Basta acessar somente os seus canais e os seis grupos, um grupo de canal para cada célula adjacente. Com isto, a complexidade do algoritmo é reduzida.
- Sem o CBWL, o empréstimo poderia ser feito por qualquer canal livre pertencente às células adjacentes. Suponha que as células 15 e 26 tenham o mesmo canal de empréstimo x , respectivamente das células 10 e 20. Assim, a potência do canal x é significativamente reduzida para se evitar um excesso na interferência co-canal.

Uma alternativa seria emprestar o canal x para apenas uma das células, 15 ou 26. Isto implicaria na necessidade de toda célula *conhecer* o uso do canal nos *clusters* mais próximos. Deste modo, o gerenciamento de canais seria bem mais complexo. Note, no entanto, que o grupo de canais a_1 pode ser emprestado somente para co-células do tipo G , o grupo de canais a_2 pode ser emprestado somente para co-células do tipo B , e assim por diante. Portanto, a própria estrutura impede os conflitos de empréstimo e interferência co-canal.

- Nos sistemas celulares atuais, por causa das características dos filtros utilizados nas estações móveis, canais adjacentes não são utilizados na mesma célula. Com uma organização cuidadosa, o esquema pode assegurar que *canais adjacentes* não sejam utilizados na mesma célula mesmo no empréstimo.

Devido à menor potência de transmissão dos canais de empréstimo, somente os assinantes cuja perda de propagação em relação à estação rádio base não exceder a um limite poderão usar um canal emprestado.

Chamaremos os assinantes que estão na região onde os canais podem ser emprestados como assinantes do *tipo A* (aqueles onde o *BCSS* é suficientemente forte). Rearranjo de canais pode ser utilizado para beneficiar os assinantes do *tipo B*. Com o rearranjo, se uma nova chamada do *tipo B* ocorre e encontra todos os canais da sua célula ocupados, a chamada *ainda não será necessariamente bloqueada*. Se ao mesmo tempo uma chamada do *tipo A* usa um canal regular e exista no mínimo uma célula adjacente que possa emprestar um canal, a chamada do *tipo A* pode usar o canal de empréstimo da célula adjacente liberando o canal regular para a chamada do *tipo B*. Além disso é utilizado também o rearranjo descrito na seção 6.1, i.e, quando um canal regular é liberado no término de uma chamada e existir uma chamada sendo atendida por um canal emprestado ocorre o rearranjo da chamada do canal emprestado para o regular dentro da mesma célula.

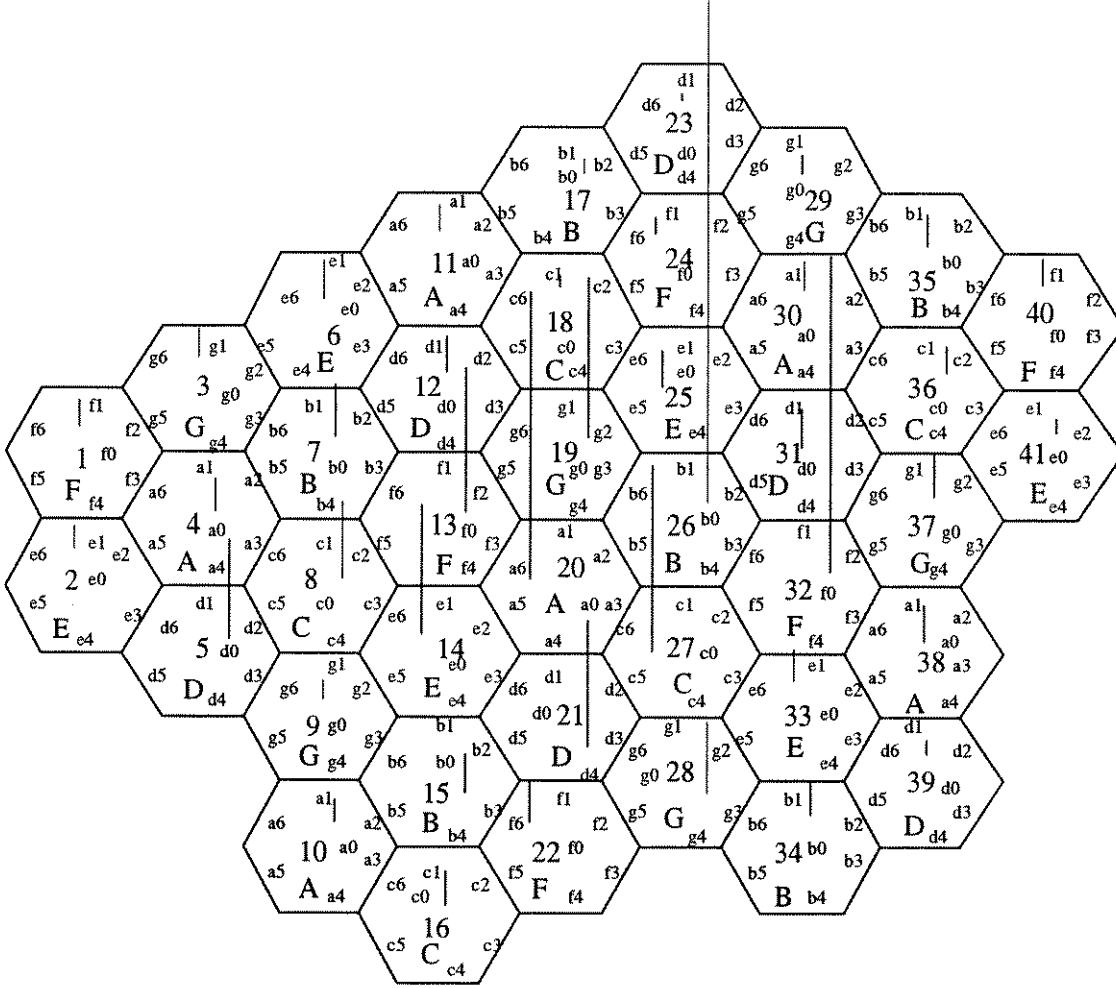


Figura 6.1: Estrutura do canal do *CBWL* no sistema real.

6.4 Validação do Modelo - Pontos de Verificação

Um dos pontos relevantes a serem considerados no estudo é como validar o modelo adotado. No que concerne o trabalho desta tese o modelo de tráfego utilizado é coerente com aqueles usados em trabalhos similares disponíveis na literatura. A principal questão, neste caso, é sobre a validação dos resultados de simulação. Alguns pontos de verificação podem ser usados para este fim.

Quando γ diminui (tráfego flexível diminui) ou quando L_i aumenta (limiar aumenta) os efeitos relativos à *VLB* diminuem e a técnica combinada tende àquela *TGA* correspondente. No limite quando $\gamma = 0$ ou $L_i > N_i \forall i$ a técnica combinada coincide com àquela

TGA (AHC, AEC, ou CBWL como explorado neste trabalho).

Por outro lado diminuindo-se a razão *canais dinâmicos/canais fixos* os efeitos da associação AHC-VLB tende àqueles da VLB. Com a mesma abordagem pode-se restringir o uso de canais emprestados permitidos no sistema, diminuindo-se este número na associação AEC-VLB ou CBWL-VLB. Em particular, na associação CBWL-VLB pode-se também diminuir o número de canais com potência reduzida para empréstimo. Em todos os casos, no limite quando o parâmetro correspondente é *setado* como zero, a técnica combinada reduz-se à VLB.

6.5 Resultados

O algoritmo Variação do Limiar de Bloqueio associado a Técnicas Globais de Alocação foi aplicado ao sistema real descrito na Seção 3.5.3 e o desempenho avaliado através de simulação.

Nesta seção mostram-se alguns resultados da probabilidade do bloqueio médio em função da flexibilidade para uma dada carga de tráfego, e em função da carga de tráfego para uma dada flexibilidade. O parâmetro de desbalanceamento é calculado para alguns casos.

6.5.1 Bloqueio Médio Versus Flexibilidade

A Figura 6.2 mostra o bloqueio médio versus flexibilidade para o sistema real onde consideramos a técnica AEC-VLB(R), onde R significa rearranjo, e um tráfego de 1.6 vezes o tráfego inicial mostrado na Figura 3.14.

O bloqueio médio é obviamente insensível à variação de γ se $L_i > N_i \forall i$. Neste caso as chamadas flexíveis são atendidas pelas suas próprias células e a estratégia coincide com o algoritmo da alocação por empréstimo de canais, onde o bloqueio médio é calculado por simulação já que não é possível obtê-lo pela fórmula *Erlang-B*.

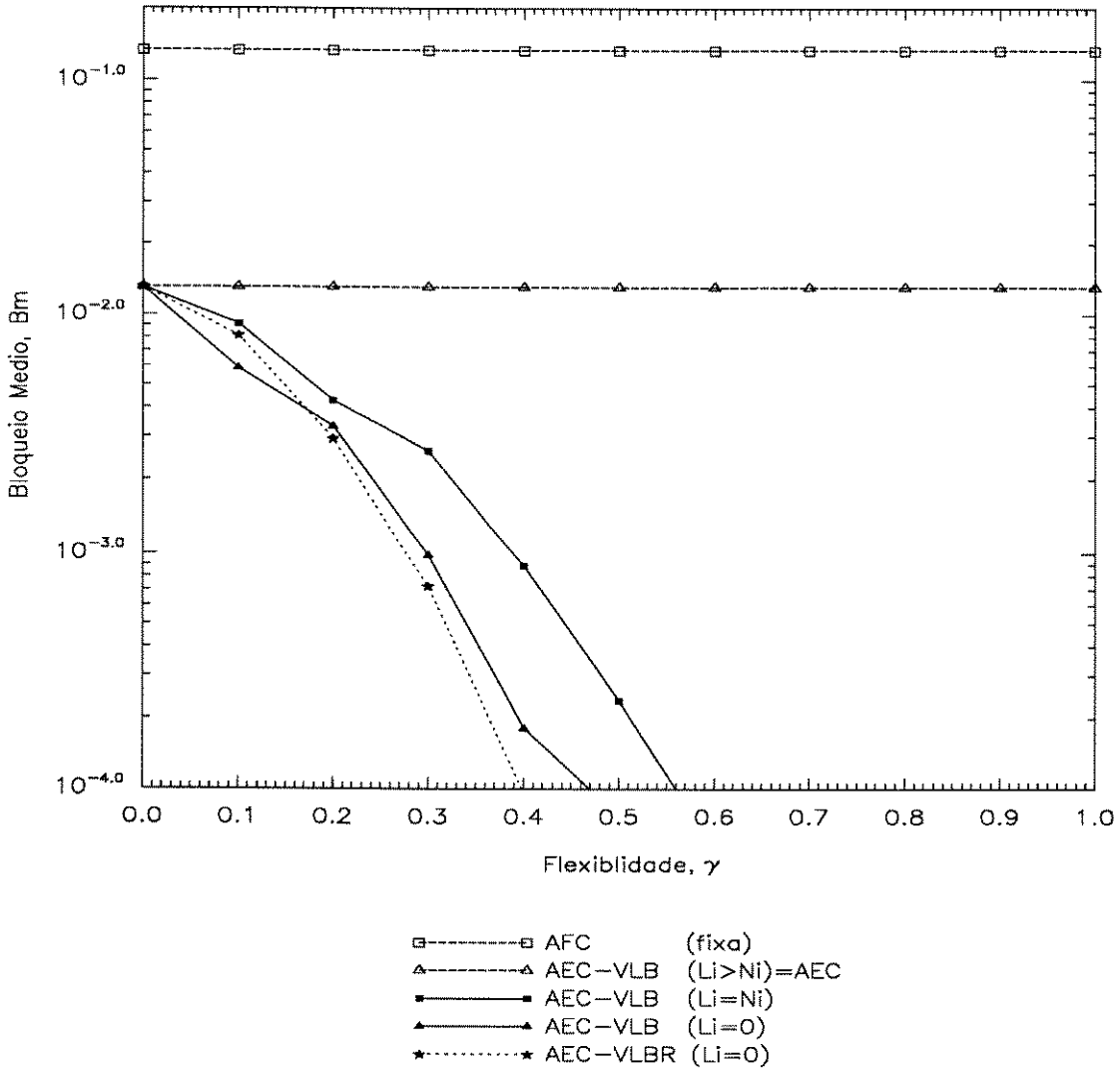


Figura 6.2: Bloqueio médio versus flexibilidade: AEC-VLB(R)

Apesar de utilizarmos dois valores de L_i ($L_i = 0$ e $L_i = N_i$) as observações do Capítulo 4 continuam válidas. Isto é, com o uso da estratégia, à medida que L_i decresce e γ aumenta uma substancial melhora é atingida quanto ao bloqueio médio do sistema. A melhora é mais significativa para L_i variando de $N_i + 1$ a N_i , situação em que a VLB e a *Directed Retry* são coincidentes. Por outro lado, para um determinado γ , à medida que L_i diminui, o bloqueio médio diminui progressivamente atingindo seu mínimo para $L_i = 0$. Neste caso o bloqueio médio é significativamente menor do que aquele obtido para $L_i = N_i$ (*Directed Retry*). Ao contrário do que ocorria na alocação fixa associada a VLB com rearranjo

(VLBR), não há muita diferença entre VLB com e sem rearranjo para valores mínimos de L_i .

A título de comparação o desempenho da VLB(R) e da técnica combinada AEC-VLB(R) está mostrada na Figura 6.3.

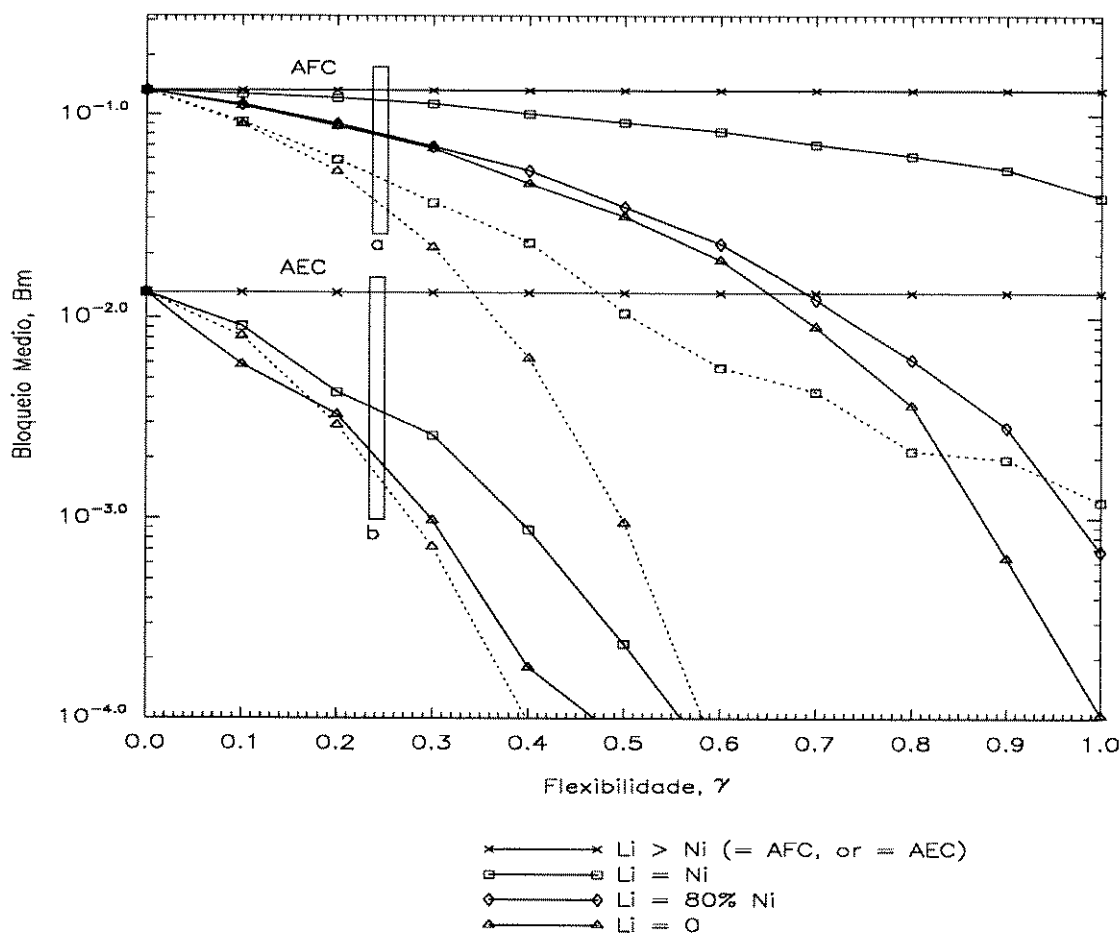


Figura 6.3: Bloqueio médio versus flexibilidade: AEC-VLB(R).

A linha cheia representa a situação sem rearranjo;

A linha pontilhada representa a situação com rearranjo.

a) Canais não permitido para empréstimo (AEC-VLB(R) coincide com VLB(R))

b) Canais permitido para empréstimo (AEC-VLB(R) implementado)

A Figura 6.4 mostra os resultados para o sistema real onde consideramos a técnica AHC-VLB(R), onde R significa rearranjo, e um tráfego de 1.6 vezes o tráfego inicial mostrado na Figura 3.14. A relação *canais fixos/canais dinâmicos* utilizada foi de 7/3.

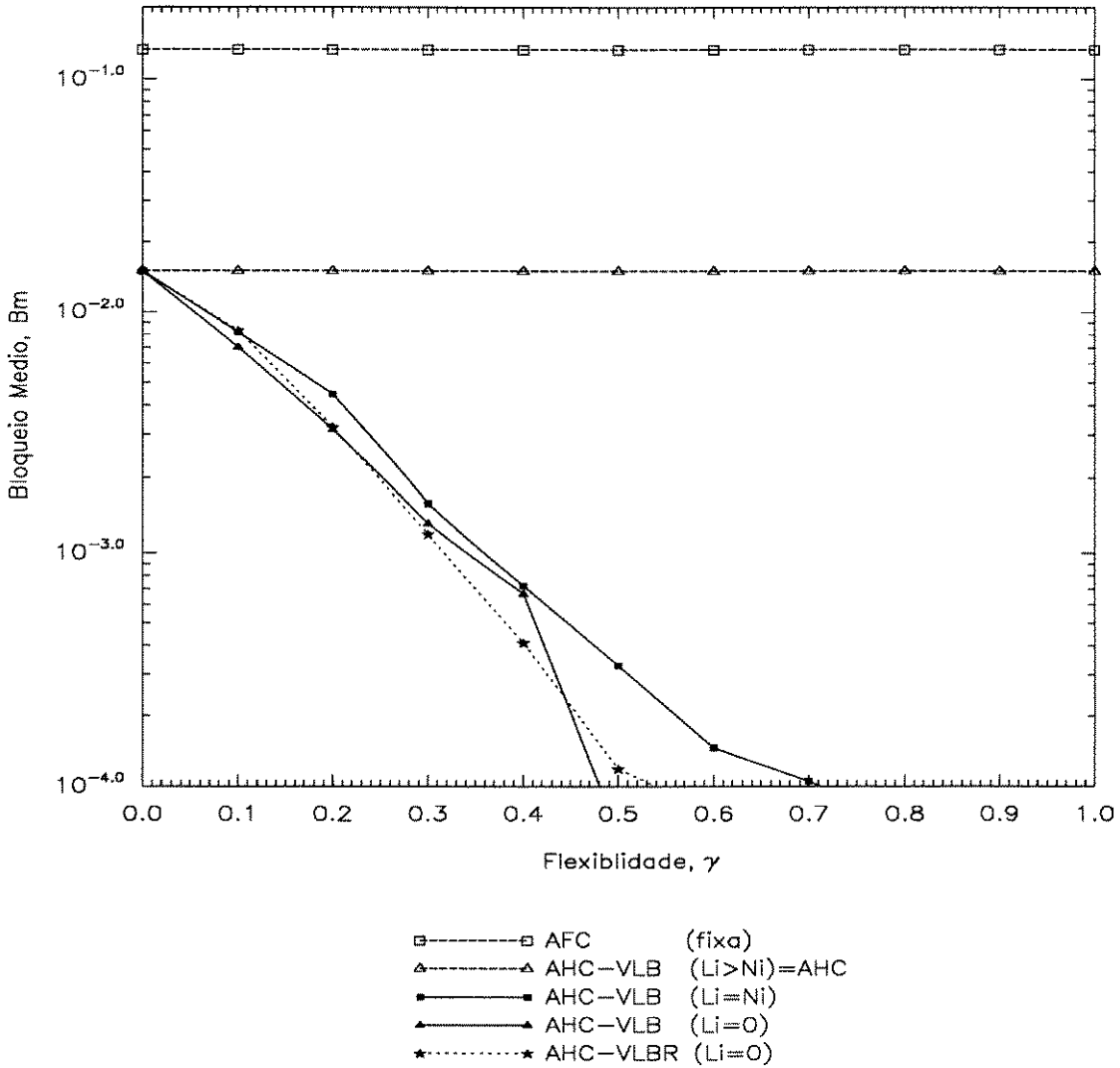


Figura 6.4: Bloqueio médio versus flexibilidade: *AHC-VLB(R)*

Note um comportamento semelhante àquele do sistema utilizando a alocação por empréstimo de canais. Note ainda que para este sistema a diferença nos ganhos entre os valores máximo e mínimo de L_i na condição sem rearranjo são menores do que aquelas experimentados pelo sistema com *AEC-VLB(R)* na mesma condição. Provavelmente isto se deve ao menor número de canais fixos utilizados (30% menor) do que o sistema com *AEC-VLB(R)*. Novamente os efeitos do rearranjo não são sentidos entre os valores mínimos de L_i .

A título de comparação o desempenho da *VLB(R)* e da técnica combinada *AHC-*

$VLB(R)$ está mostrada na Figura 6.5.

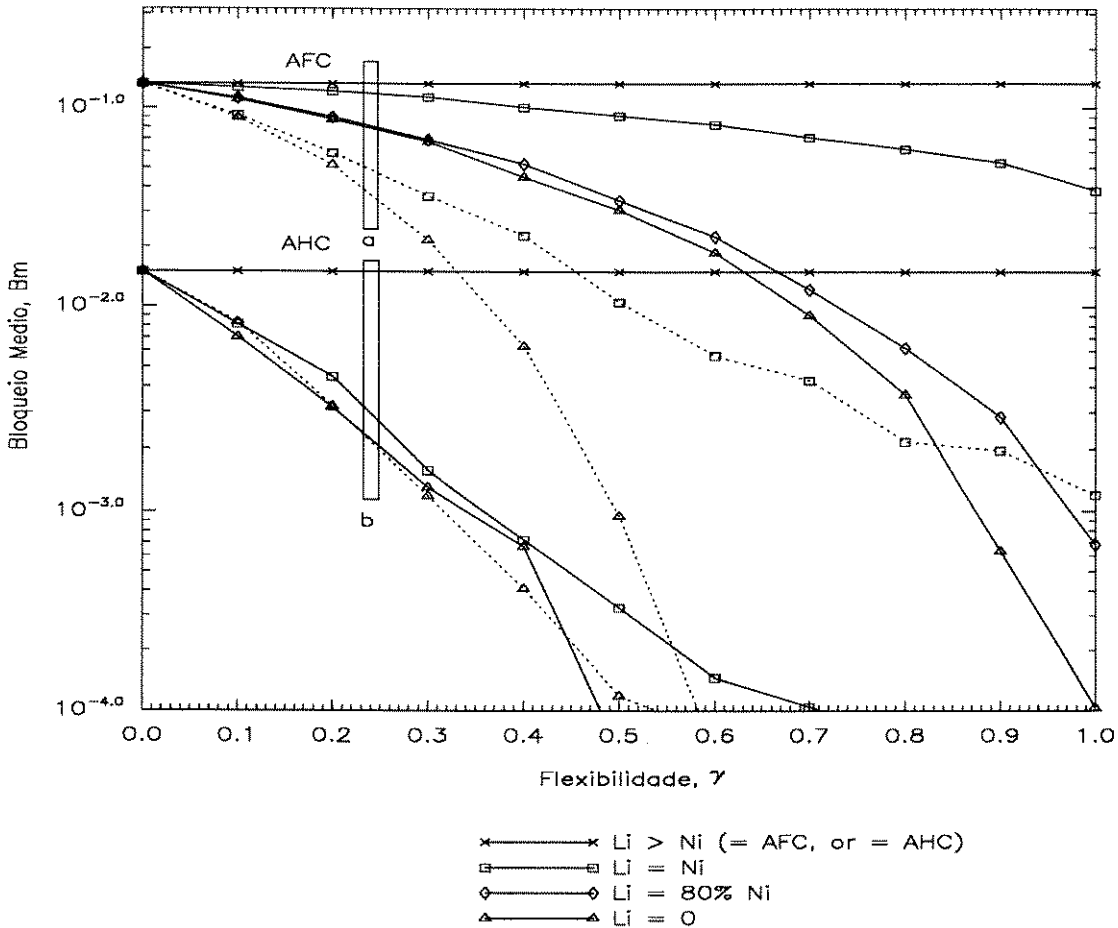


Figura 6.5: Bloqueio médio versus flexibilidade: AHC- $VLB(R)$.

A linha cheia representa a situação sem rearranjo;

A linha pontilhada representa a situação com rearranjo.

a) Canais dinâmicos/canais fixos = 0 ($AHC-VLB(R)$ coincide com $VLB(R)$)

b) Canais dinâmicos/canais fixos = 3/7 ($AHC-VLB(R)$ implementado)

A Figura 6.6 mostra os resultados para o sistema real onde consideramos a técnica $CBWL-VLB(R)$, onde R significa rearranjo, e um tráfego de 1.6 vezes o tráfego inicial mostrado na Figura 3.14. A região de $CBWL$ utilizada foi de 30%, ou seja, 30% da área mais próxima da estação rádio base pode empregar o empréstimo de canais de acordo com estrutura descrita na Figura 6.1.

Observe que para este sistema a diferença nos ganhos entre os valores máximo e mínimo

de L_i na condição sem rearranjo é maior do que aquela obtida nos dois sistemas anteriores na mesma condição. O comportamento é bastante semelhante àquele do sistema real usando alocação fixa e *VLB*. Ao contrário dos dois sistemas anteriores, os efeitos do rearranjo são significativos para valores grandes de γ .

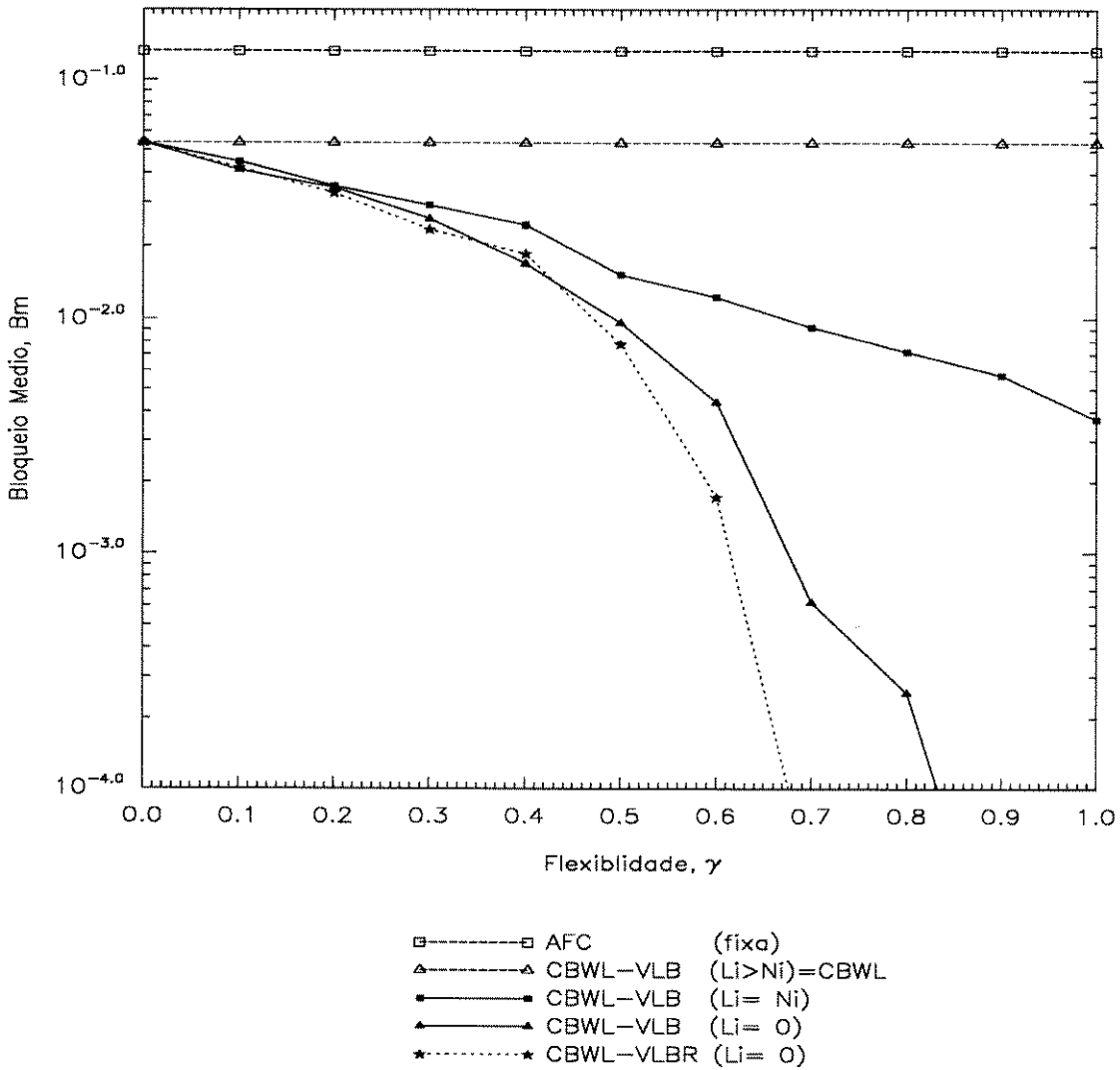


Figura 6.6: Bloqueio médio versus flexibilidade: *CBWL-VLB(R)*.

A título de comparação o desempenho da *VLB(R)* e da técnica combinada *CBWL-VLB(R)* está mostrada na Figura 6.7.

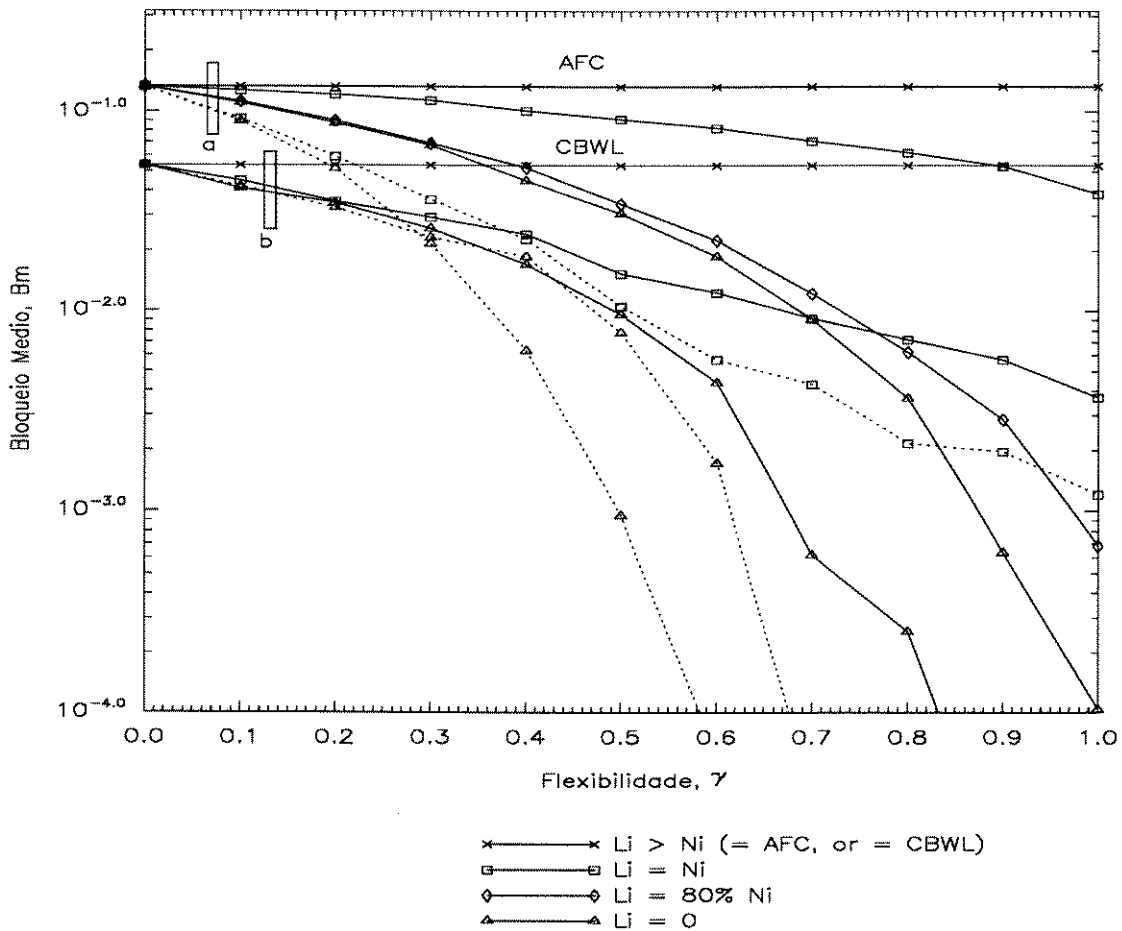


Figura 6.7: Bloqueio médio versus flexibilidade: $CBWL-VLB(R)$.

A linha cheia representa a situação sem rearranjo;

A linha pontilhada representa a situação com rearranjo.

a) Região $CBWL = 0\%$ ($CBWL-VLB(R)$ coincide com $VLB(R)$)

b) Região $CBWL = 30\%$ ($CBWL-VLB(R)$ implementado)

A Tabela 6.1 mostra a evolução do desbalanceamento com o aumento da flexibilidade para um valor de limiar $L_i = 0$ para as três técnicas sob investigação.

Note que, em média, os sistemas, em geral, tendem a uma melhora na condição de balanceamento com o aumento da flexibilidade.

flexibilidade (γ)	AEC-VLB(R)		AHC-VLB(R)		CBWL-VLB(R)	
	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)
0.0	0.216614	0.216614	0.215391	0.215391	0.199920	0.199920
0.1	0.204722	0.204807	0.205774	0.207652	0.191260	0.191423
0.2	0.192744	0.190757	0.197263	0.200798	0.182475	0.183081
0.3	0.182064	0.181665	0.190853	0.194214	0.174124	0.173673
0.4	0.174667	0.171491	0.184054	0.187023	0.166895	0.163723
0.5	0.166096	0.160936	0.175904	0.178074	0.160886	0.153885
0.6	0.158816	0.156005	0.169487	0.174239	0.157381	0.144633
0.7	0.153516	0.151569	0.164277	0.162939	0.152247	0.141038
0.8	0.148588	0.148264	0.159969	0.139030	0.149608	0.140194
0.9	0.145795	0.145686	0.151857	0.117995	0.146343	0.141008
1.0	0.144741	0.145448	0.147387	0.137090	0.146400	0.146400

Tabela 6.1: Evolução do desbalanceamento com o aumento da flexibilidade, onde VLBR é a Variação do Limiar de Bloqueio com Rearranjo.

6.5.2 Bloqueio Médio Versus Tráfego

A Figura 6.8 mostra o bloqueio médio versus tráfego normalizado para o mesmo sistema real onde consideramos a técnica $AEC-VLB(R)$, onde R significa rearranjo, e uma flexibilidade de 40%.

A curva superior ($L_i > N_i$) corresponde ao caso em que a técnica combinada e o algoritmo da alocação por empréstimo de canais são coincidentes. Para $0 \leq L_i \leq N_i$ os efeitos da combinação são sentidos e um substancial ganho de tráfego pode ser observado com o seu máximo atingido para $L_i = 0$. Observe que neste caso o uso de rearranjo de chamada possibilita uma maior flexibilidade para o sistema provocando um pequeno

aumento na capacidade de tráfego.

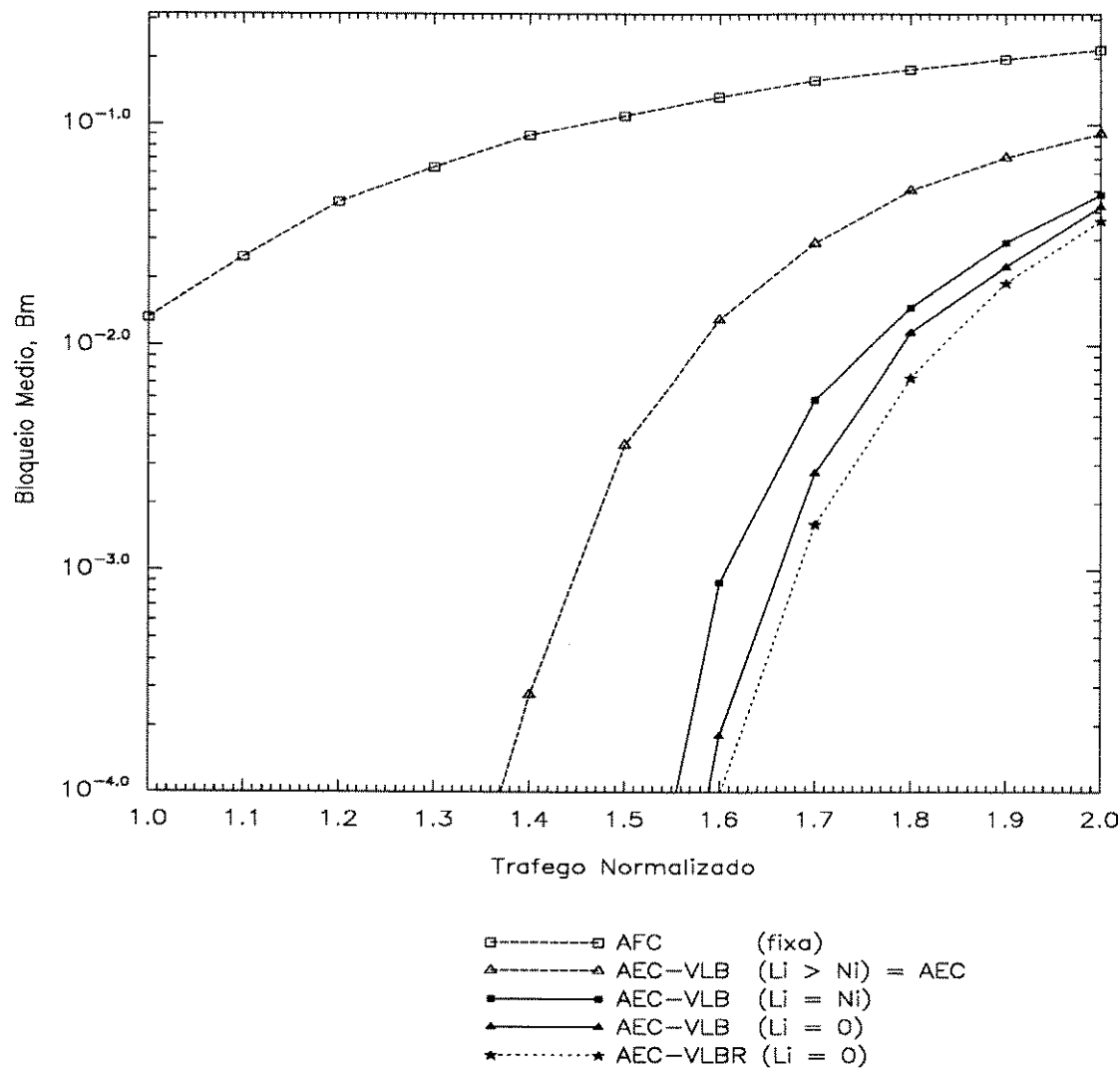


Figura 6.8: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: AEC-VLB(R)

A título de comparação o desempenho da VLB(R) e da técnica combinada AEC-VLB(R) está mostrada na Figura 6.9.

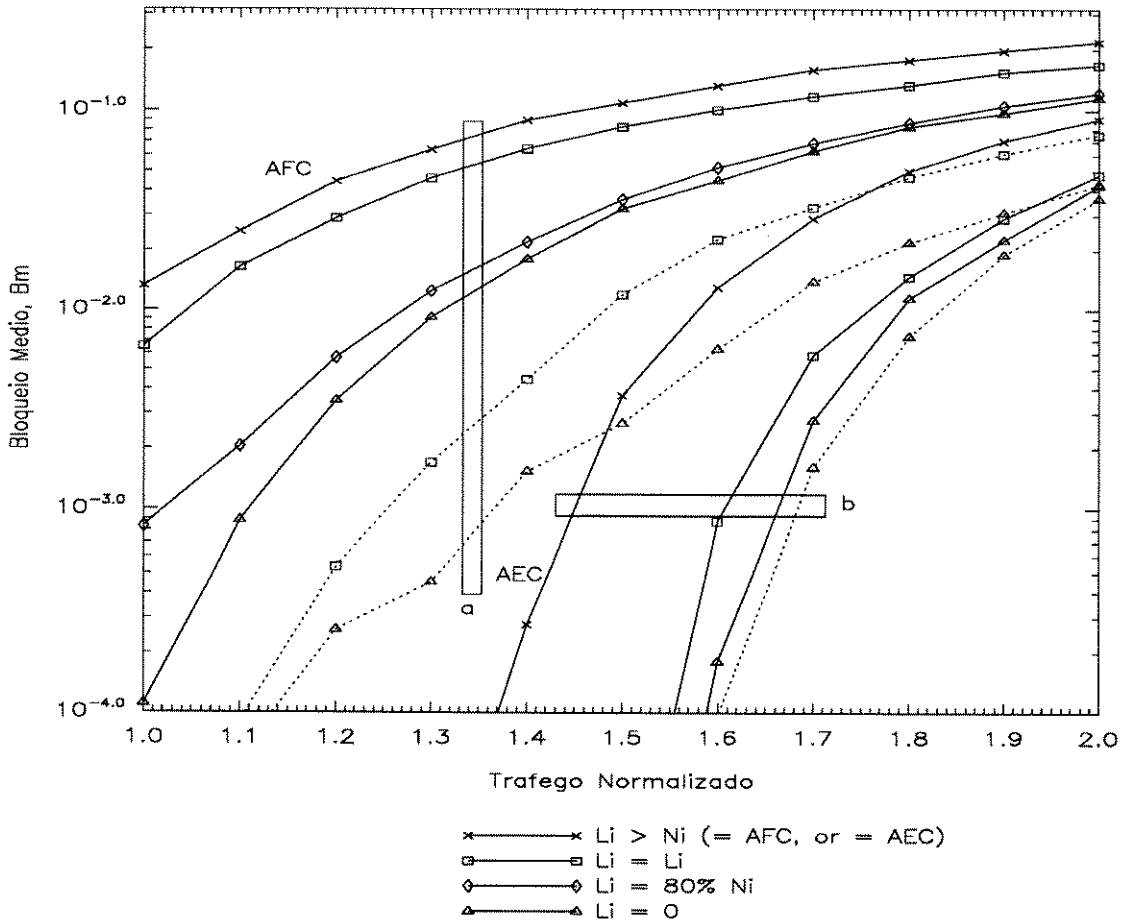


Figura 6.9: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: AEC-VLB(R).

A linha cheia representa a situação sem rearranjo;

A linha pontilhada representa a situação com rearranjo.

a) Canais não permitido para empréstimo (AEC-VLB(R) coincide com VLB(R))

b) Canais permitido para empréstimo (AEC-VLB(R) implementado)

A Figura 6.10 mostra os resultados para o sistema real com a técnica AHC-VLB(R), onde R significa rearranjo. Como foi observado anteriormente, não existem diferenças significativas no bloqueio médio ao variarmos L_i . Além disso o rearranjo de chamadas praticamente não influi no aumento do desempenho da técnica combinada.

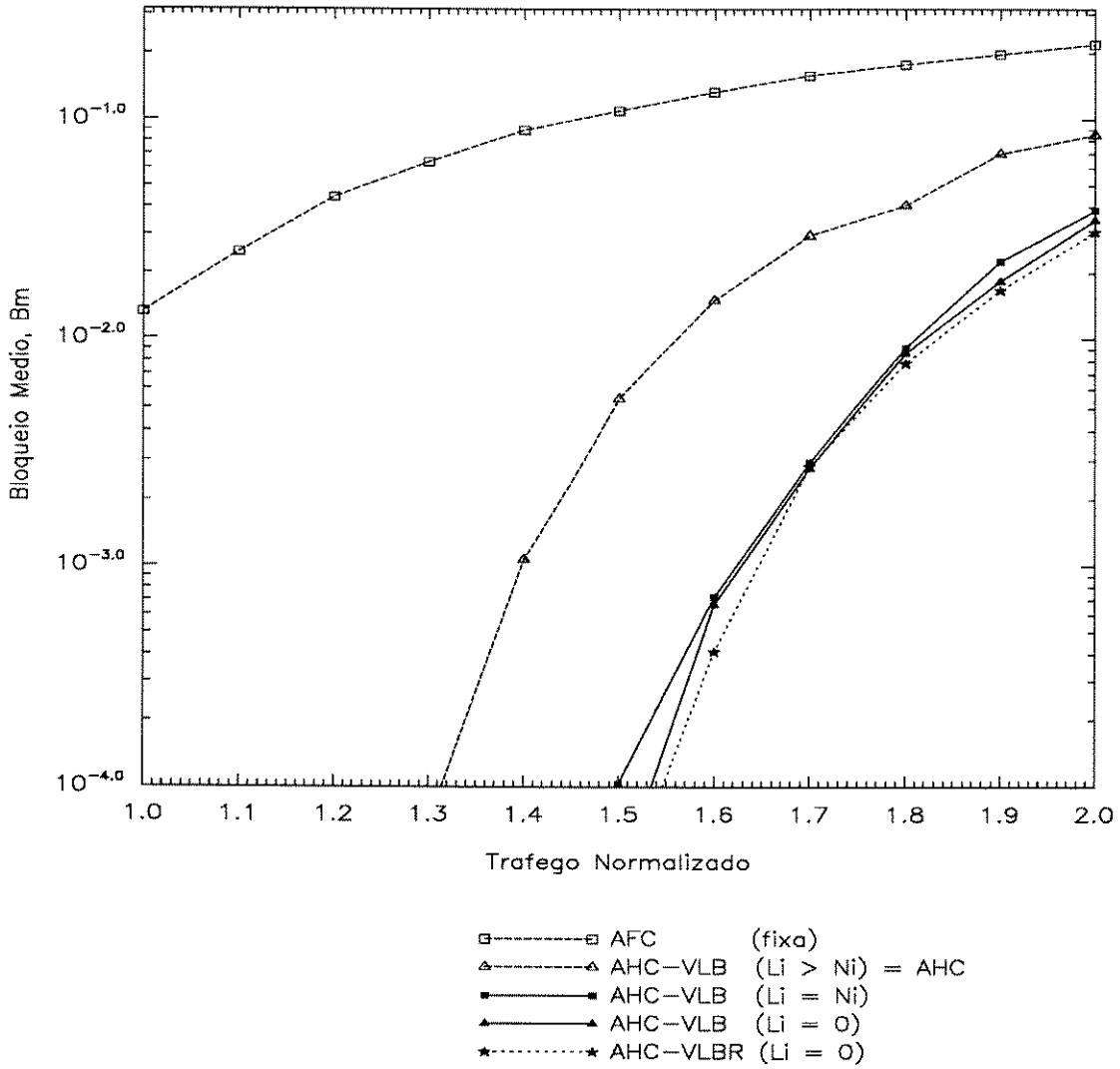


Figura 6.10: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: AHC-VLB(R).

A título de comparação o desempenho da VLB(R) e da técnica combinada AHC-VLB(R) está mostrada na Figura 6.11.

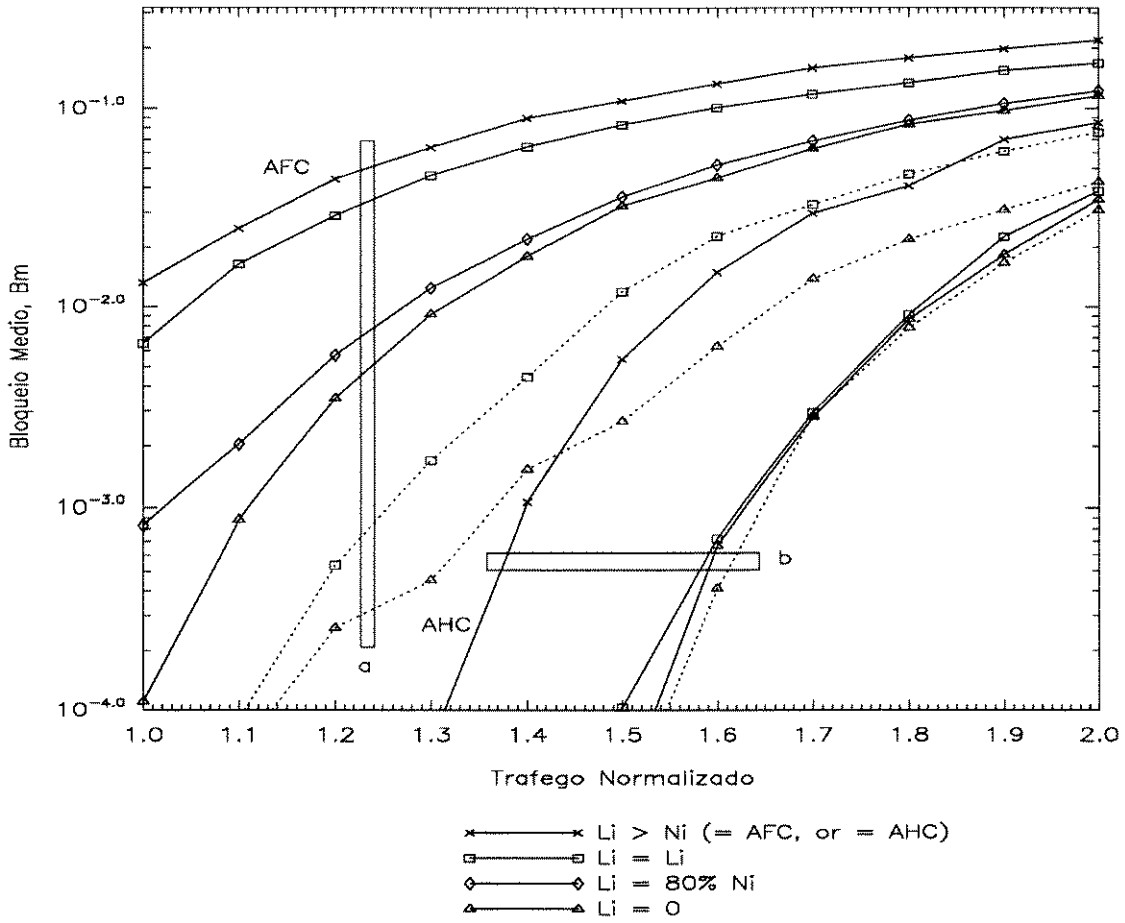


Figura 6.11: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: *AHC-VLB(R)*.

A linha cheia representa a situação sem rearranjo;

A linha pontilhada representa a situação com rearranjo.

a) Canais dinâmicos/canais fixos = 0 (*AHC-VLB(R)* coincide com *VLB(R)*)

b) Canais dinâmicos/canais fixos = 3/7 (*AHC-VLB(R)* implementado)

Analogamente, a Figura 6.12 mostra os resultados para o sistema real e a técnica *CBWL-VLB(R)*, onde *R* significa rearranjo. As mesmas observações citadas anteriormente para o sistema com *AEC-VLB(R)* também são válidas aqui.

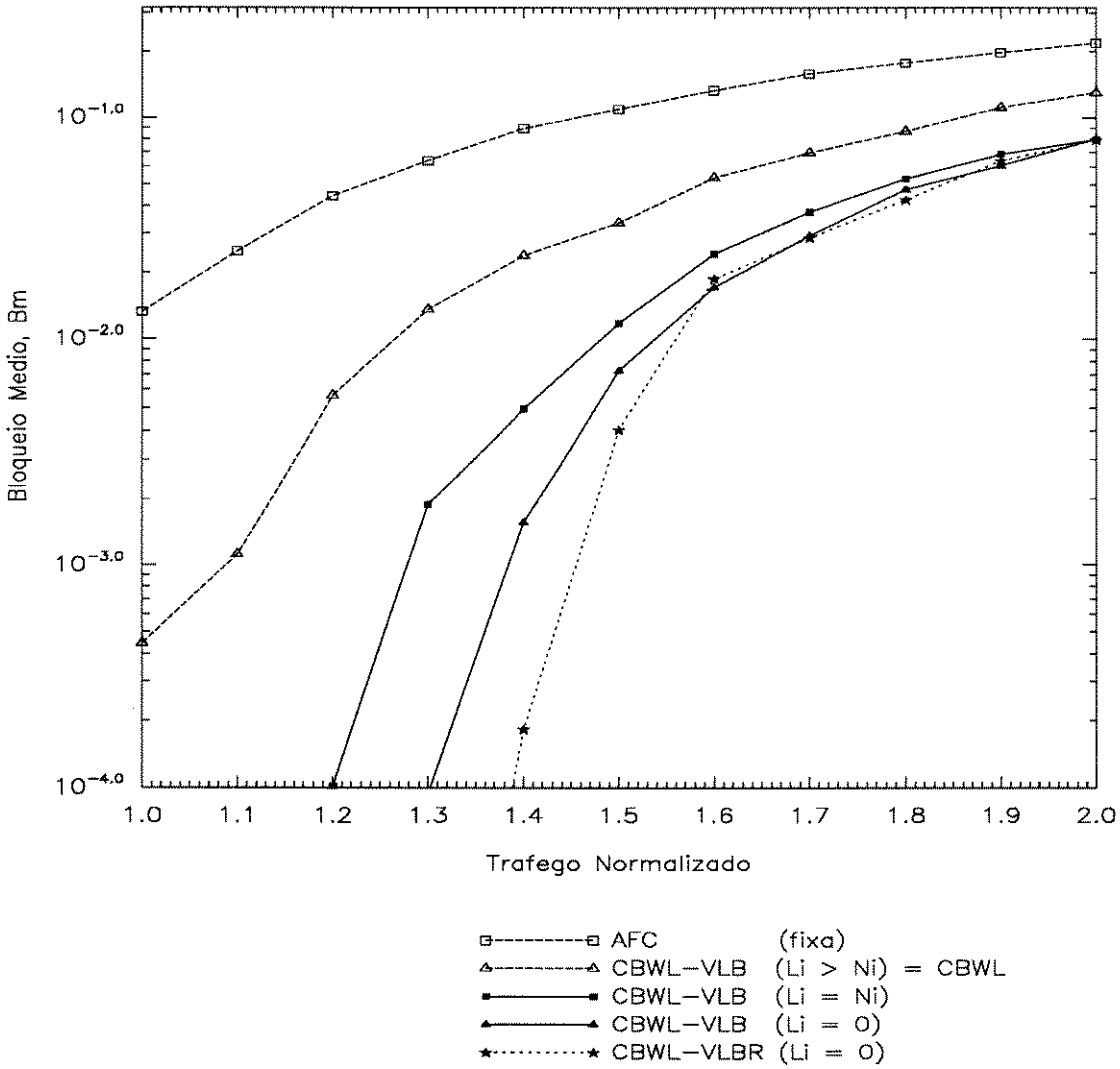


Figura 6.12: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: *CBWL-VLB(R)*.

A título de comparação o desempenho da *VLB(R)* e da técnica combinada *CBWL-VLB(R)* está mostrada na Figura 6.13.

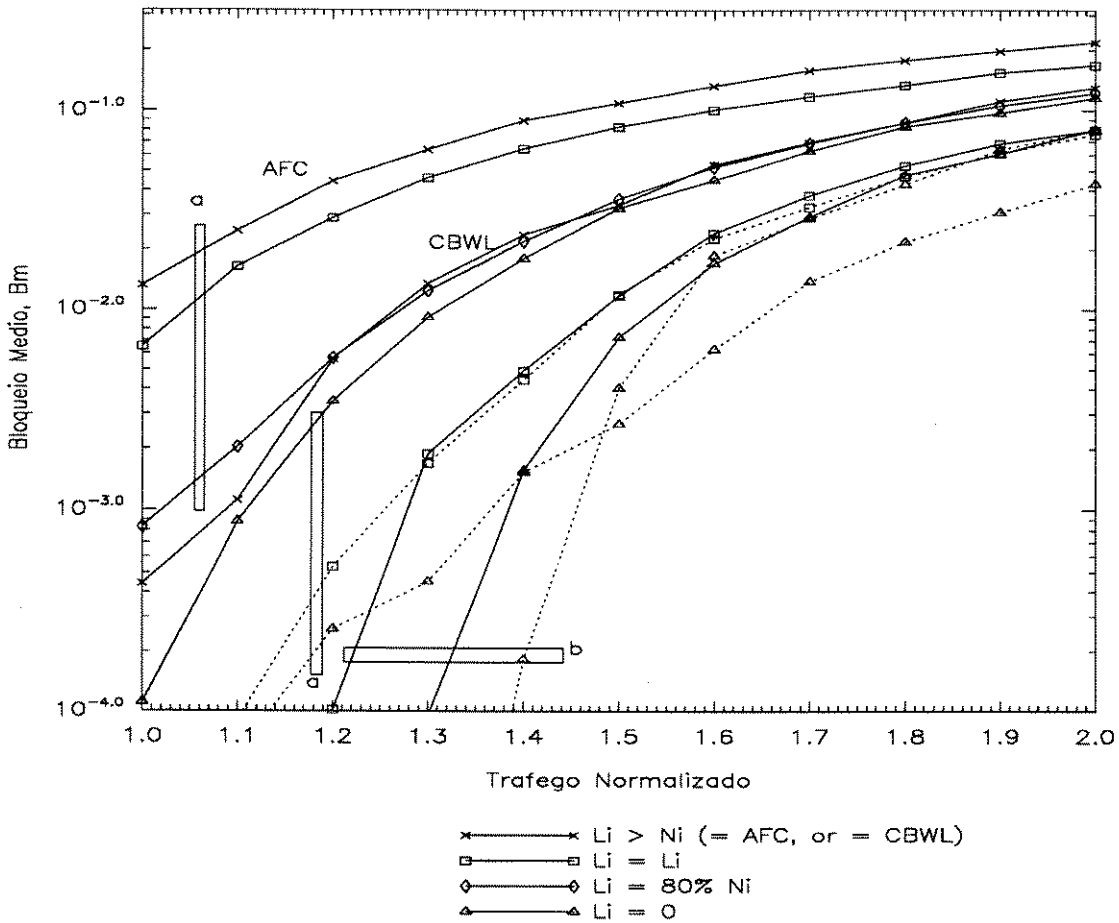


Figura 6.13: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: *CBWL-VLB(R)*.

A linha cheia representa a situação sem rearranjo;

A linha pontilhada representa a situação com rearranjo.

a) Região $CBWL = 0\%$ (*CBWL-VLB(R)* coincide com *VLB(R)*)

b) Região $CBWL = 30\%$ (*CBWL-VLB(R)* implementado)

A Tabela 6.2 mostra a evolução do desbalanceamento com o aumento do tráfego para uma flexibilidade de 40% e um valor de limiar $L_i = 0$ para as três técnicas sob investigação.

Note que, em média, os sistemas tendem a uma melhora na condição de balanceamento com o aumento do tráfego a menos do sistema com a técnica *AHC-VLB(R)*. Neste caso há o aumento do desbalanceamento com o aumento do tráfego. De fato, como tem-se constatado, o aumento de tráfego implica um aumento do número de canais impedidos, provocando uma piora na distribuição do tráfego escoado.

tráfego (A)	AEC-VLB(R)		AHC-VLB(R)		CBWL-VLB(R)	
	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)	VLB (β)	VLBR (β)
1.0	0.187201	0.193395	0.177421	0.150438	0.182506	0.182506
1.1	0.183378	0.187248	0.176176	0.152094	0.186828	0.176124
1.2	0.176886	0.176429	0.175726	0.156197	0.182930	0.169027
1.3	0.176882	0.173937	0.177679	0.169787	0.178749	0.166656
1.4	0.176761	0.173303	0.181114	0.176541	0.174287	0.163802
1.5	0.176404	0.173593	0.180140	0.183405	0.170992	0.162695
1.6	0.174667	0.171491	0.184054	0.187023	0.166895	0.163723
1.7	0.172778	0.171592	0.184675	0.187869	0.163282	0.161550
1.8	0.171858	0.169988	0.184495	0.187695	0.160341	0.158100
1.9	0.169524	0.167760	0.182858	0.182997	0.154449	0.153790
2.0	0.166793	0.168219	0.181390	0.183644	0.151680	0.150695

Tabela 6.2: Evolução do desbalanceamento com o aumento do tráfego

6.6 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo propôs-se a combinação de Técnicas Globais de Alocação (*TGA*) e Técnicas Locais de Alocação (*TLA*). As técnicas pertencentes a estes dois grupos têm sido investigadas de forma isolada sendo que tem-se concebido exclusividade de aplicação das técnicas. Ou seja, uma vez decidido pelo uso de uma técnica em um grupo todas as demais do outro grupo estarão automaticamente excluídas. Este trabalho propôs exatamente a combinação destas técnicas.

Em particular utilizaram-se em *TGA* a Alocação por Empréstimo de Canais, a Alocação Híbrida de Canais, e o *Channel Borrowing Without Locking*, e em *TLA* a Variação do Limiar de Bloqueio.

A técnica em *TGA* original é obtida a partir da técnica combinada para flexibilidade

nula e/ou para um limiar de bloqueio superior ao número de canais da célula. Da mesma forma, a técnica em *TGA* pode ser obtida fazendo-se a técnica em *TGA* tender a *AFC* através da manipulação conveniente de seus parâmetros.

O ganho obtido com a técnica combinada é de fato substancial. Quanto menor o limiar L_i menor a probabilidade de bloqueio, com seu mínimo atingido em $L_i = 0$. Existem diferenças entre as três combinações. Enquanto que na alocação por empréstimo de canais e na *CBWL* o comportamento é muito semelhante àquele da alocação fixa quando empregamos a *VLB*, o mesmo não ocorre na alocação híbrida. A variação de L_i praticamente não afeta o desempenho do sistema e, além disso, o efeito do rearranjo de chamadas é quase insignificante, embora, como já mencionado, a técnica combinada forneça resultados melhores do que as técnicas individuais.

Uma consequência direta desta melhoria é o aumento da capacidade do sistema. Em outras palavras, admitindo-se um grau de serviço como aquele de antes da aplicação das técnicas, o tráfego oferecido deverá ser bem maior quando se utiliza as técnicas. Por exemplo, seja a Figura 6.8 onde se tem a combinação *AEC-VLB(R)*. Para um bloqueio de 2% o ganho em tráfego obtido com a combinação e $L_i = 0$ é de aproximadamente $(1.9 - 1.08)/1.08 \approx 75\%$. Outros exemplos poderiam ser dados com as demais combinações.

Um aumento de complexidade devido à combinação é obviamente esperado, mas, devido a que os algoritmos em *TGA* são razoavelmente simples, acredita-se que a complexidade global seja ditada predominantemente por aquela inerente a do algoritmo em *TGA*. Por outro lado o aumento do ganho da combinação é bem maior do que os ganhos individuais.

Capítulo 7

Técnicas Globais de Alocação: Propostas

Um grande número de técnicas de alocação de canais, objetivando aplicações em rádio móvel, tem sido proposta e extensivamente investigada na literatura. As pesquisas nesta área têm-se intensificado ultimamente com o advento dos Sistemas de Comunicações Pessoais (*Personal Communications Systems - PCS*). A disputa *TDMA* versus *CDMA* também tem contribuído para isto, uma vez que alocação de canais é, certamente, um fator a ser utilizado para melhorar a performance de tráfego do sistema com uma conseqüente melhor utilização do espectro disponível.

Como já mencionado anteriormente, os algoritmos de alocação podem ser agrupados em Técnicas Globais de Alocação (TGA) e Técnicas Locais de Alocação (TGA), sendo as primeiras o objetivo deste Capítulo.

Basicamente as Técnicas Globais de Alocação são caracterizadas por dois extremos: Alocação Fixa de Canais (*AFC*) e Alocação Dinâmica de Canais (*ADC*) [26]. *AFC* aloca canais para cada célula de acordo com um perfil de tráfego *estimado* na célula. *AFC* demanda uma quantidade moderada de *ERBs* e usa um algoritmo de controle simples, porém não alcança uma alta eficiência na utilização dos canais sobre a área de serviço se o tráfego varia dinamicamente no espaço e no tempo. *ADC* vem sendo estudada há mais de vinte anos no esforço de resolver este problema. Em *ADC*, os canais são alocados

dinamicamente de acordo com a demanda de tráfego.

De estudos anteriores [20, 21] sabe-se que a *ADC* apresenta uma performance superior à *AFC* para baixo tráfego, sendo que este comportamento se reverte para alto tráfego. Isto se verifica em função de vários fatores incluindo aí o impedimento de canais utilizado para se manter a interferência co-canal em níveis toleráveis.

Neste capítulo propõem-se cinco algoritmos *ADC* em que o efeito dos fatores responsáveis pela queda de desempenho das técnicas globais de alocação, incluindo-se aí impedimento de canais e outros, são minimizados. Além disso uma técnica de rearranjo de canais é também proposta.

Nos algoritmos *ADC* propostos levam-se em conta a distância mínima de reuso, quantidade de co-células ativas, grau de serviço, quantidade de canais impedidos, combinados apropriadamente com o rearranjo proposto. A Seção 7.1 descreve as características básicas da *ADC* considerando o bloqueio médio, bloqueio de handoff, equipamento RF, e complexidade do algoritmo. A Seção 7.2 apresenta as principais estratégias *ADC* separadas por classe (convencional, alocação otimizada de canais, e monitoração do canal). A Seção 7.3 descreve as cinco propostas *ADC* deste trabalho além do rearranjo. A Seção 7.4 mostra os resultados obtidos, através de simulação, das cinco propostas. A Seção 7.5 finaliza com sumário e conclusões.

7.1 Características Básicas da ADC

Relativamente à Alocação Fixa de Canais a Alocação Dinâmica de Canais apresenta as seguintes características:

- Vantagens
 - menor bloqueio de novas chamadas para baixo tráfego;
 - menor bloqueio de *handoff* para o mesmo bloqueio de novas chamadas.
- Desvantagens

- alto bloqueio de novas chamadas para alto tráfego;
- mais equipamento de rádio-frequência (*RF*) para cada *ERB*;
- algoritmo de alocação de canais mais complexo.

A seguir examinaremos estas vantagens e desvantagens mais detalhadamente.

7.1.1 Taxa de Bloqueio

A Figura 7.1 ilustra genericamente a relação entre intensidade de tráfego e a taxa de bloqueio para as duas estratégias *AFC* e *ADC*. Sob baixo tráfego, *ADC* utiliza os canais mais eficientemente do que *AFC* por causa da flexibilidade na alocação de canais. Sob alto tráfego, entretanto, *ADC* não apresenta uma performance tão boa quanto *AFC*.

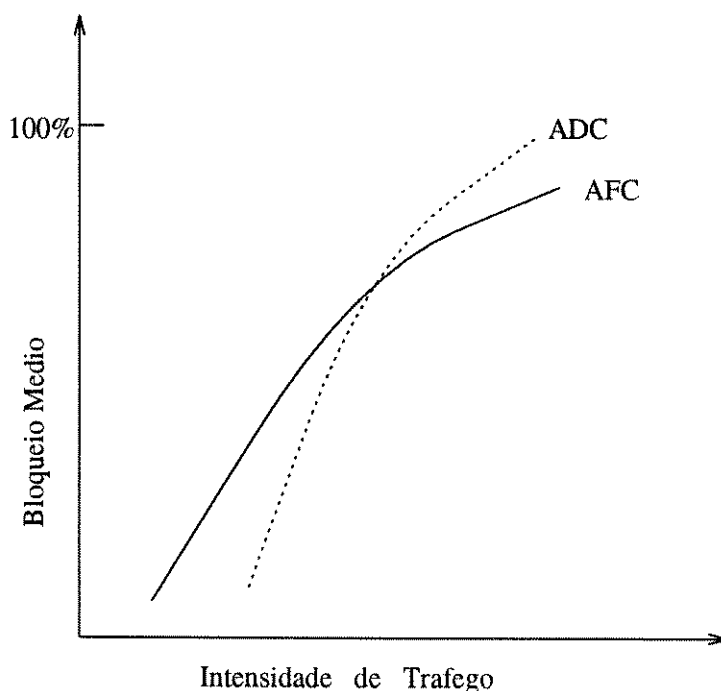


Figura 7.1: Bloqueio Médio versus Tráfego.

Este comportamento pode ser explicado como se segue. Seja D a distância entre duas

células utilizando o mesmo canal e D_r a distância *mínima* para se evitar interferência co-canal. D deve ser maior ou igual a D_r . AFC pré-determina os canais de cada célula de modo que $D = D_r$. ADC aloca canais dinamicamente sob demanda. Isto significa que em ADC $D \geq D_r$. Especificamente, quando $D > D_r$, para que a interferência co-canal seja mantida em níveis aceitáveis, canais devem ser impedidos de uso nas correspondentes co-células.

Para baixo tráfego o efeito do impedimento é irrelevante já que a taxa de ocupação dos canais é baixa, e a probabilidade de se achar um canal não impedido para o atendimento das chamadas é grande. Nesta condição, em AFC uma célula pode estar bloqueada enquanto que uma outra pode ter seus canais ociosos. Assim, devido a que o dimensionamento do sistema é feito para a hora de maior movimento (*HMM*), os canais em ADC são utilizados mais eficientemente do que em AFC. Para alto tráfego, no entanto, o efeito do impedimento pode ser desastroso. À medida que o tráfego aumenta, o número de canais impedidos aumenta e muitas chamadas começam a ser perdidas pelo impedimento.

7.1.2 Bloqueio de Handoff

Quando uma estação móvel move-se na direção da célula adjacente, a chamada deve ser transferida para a *ERB* adjacente num procedimento conhecido como *handoff*. Se todos os canais estiverem ocupados na nova célula, a chamada deve ser bloqueada. O bloqueio de *handoff* é um fator muito importante no grau de serviço.

Em AFC há a troca de canal no *handoff* pois o mesmo canal não pode ser alocado para células adjacentes (interferência co-canal). A alocação de canal no *handoff* é feita da mesma forma que numa chamada normal. Em ADC, a chamada pode manter o mesmo canal no *handoff* na nova célula desde que não haja interferência co-canal. Se o canal não pode ser mantido, ADC ainda pode alocar outro canal da mesma maneira que numa chamada normal. Isto ocasiona uma menor taxa de bloqueio de *handoff*. Esta vantagem está ilustrada na Figura 7.2, onde AFC pode alocar somente o canal *b* na nova célula, porém ADC pode alocar quaisquer dos três canais.

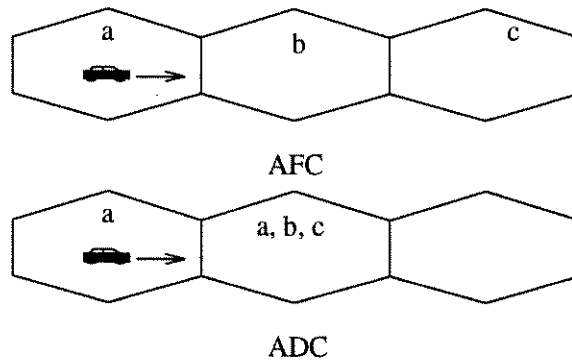


Figura 7.2: Menor taxa de bloqueio de *handoff* em *ADC*; *a*, *b*, e *c* são os canais do sistema. *AFC* pode alocar somente o canal *b* para a nova célula, porém *ADC* pode alocar quaisquer dos três canais.

7.1.3 Equipamento RF

O equipamento RF da *ERB* está diretamente ligado ao número de canais, e na *AFC* utilizam-se somente os canais fixos associados às *ERBs*. Em *ADC* o número de canais alocados para cada *ERB* varia. Assim a *ERB* tem de prover todos os canais alocados à sua célula, exigindo mais equipamentos RF. O número de canais providos depende da estratégia *ADC* empregada. Nos casos extremos, o número de canais alocados é igual ao número total de canais do sistema.

7.1.4 Complexidade do Algoritmo

Em *AFC* a alocação de canal é feita independentemente das outras células, selecionando-se um canal livre dentre os canais dedicados à célula em questão. Em *ADC* o conhecimento de quais canais estão ocupados nas outras células, bem como na célula em questão, é mandatório. A complexidade do controle é diferente para cada estratégia *ADC*. Se uma determinada estratégia *ADC* exige muitos processos e o conhecimento da situação de toda a área de serviço, o tempo de estabelecimento da chamada será significativo a menos que a *CCC* utilize processadores e sistemas de sinalização mais rápidos do que os atuais. Este

problema aumenta à medida que cresce a quantidade de *ERBs* no sistema.

7.2 Principais Estratégias ADC

Como foi visto no Capítulo 2, várias estratégias *ADC* têm sido propostas. A seguir descreveremos, sucintamente¹, algumas das principais estratégias *ADC* listadas na Tabela 7.1.

Classe 1: Estratégias ADC Convencionais	First Available (FA)
	Mean Square (MSQ)
	Nearest Neighbor (NN)
	Nearest Neighbor + 1 (NN + 1)
	1-Clique
Classe 2: Estratégias ADC Usando Alocação Otimizada de Canais	Alocação por Empréstimo de Canais
	Alocação Híbrida de Canais
	Scheduled Channel Assignment
	Alocação Fixa e Dinâmica de Canais
Classe 3: Estratégias ADC Usando Monitoração do Canal	Segregação de Canais
	Reuso Flexível

Tabela 7.1: Principais Estratégias ADC.

7.2.1 Estratégias ADC Convencionais

Estas estratégias foram as primeiras propostas em *ADC*. Elas têm as características básicas e essenciais da *ADC*. O controle na alocação de canal é baseado na informação

¹Vide o Capítulo 2 para maiores detalhes.

dos canais ocupados no momento da requisição de um canal. Todos os canais podem ser alocados dinamicamente.

A estratégia *First Available (FA)* [26] aloca o primeiro canal disponível, ou seja, o primeiro canal encontrado que não esteja sendo utilizado pelas *ERBs* cujas distâncias de reuso não sejam menores do que D_r da *ERB* em questão.

Quanto menor a distância de reuso do canal, maior o reuso do canal sobre toda a área de serviço. As estratégias *Mean Square (MSQ)*, *Nearest Neighbor (NN)*, e *Nearest Neighbor + 1 (NN + 1)* [26] basicamente alocam o canal que esteja disponível na célula em questão, porém que esteja sendo utilizado pelas células mais próximas sem sofrer interferência co-canal. O canal selecionado está sendo usado pela *ERB* mais próxima que preenche a restrição de distância de reuso imposta por cada estratégia. A estratégia *MSQ* seleciona o canal livre com o intuito de minimizar a distância média entre as co-células. A estratégia *NN* escolhe o canal livre baseado na co-célula mais próxima, ou seja, $D \geq D_r$. A estratégia *NN + 1* é similar à estratégia *NN*. Ela busca o canal livre baseado na co-célula com distância $D \geq D_r + 1$, onde 1 significa o intervalo entre células adjacentes. Se nenhum canal livre for encontrado naquelas condições, aloca-se qualquer canal disponível, i.e, canal relacionado à co-célula com a distância D_r . A estratégia *NN + 1* apresenta uma taxa de bloqueio de *handoff* menor que a *NN*. Provavelmente isto se deve ao fato de o assinante manter o mesmo canal ao se mover para a célula adjacente. Por outro lado, a estratégia *NN + 1* possui uma taxa de bloqueio de novas chamadas mais alta que a *NN*.

Simulações computacionais das estratégias *FA*, *MSQ*, *NN* e *NN + 1* sob baixo tráfego mostram que a *NN* é aquela que apresenta a menor taxa de bloqueio, seguida da *MSQ*. As estratégias *FA* e *NN + 1* possuem taxa de bloqueio muito próxima e são as mais altas [26].

A estratégia *1-clique* [29] emprega a teoria de grafos para expressar a estrutura de interferência co-canal sob toda a área de serviço. Os vértices do grafo representam as *ERBs*, e os vértices das *ERBs* sem interferência co-canal são ligados nas extremidades. Os grafos são construídos para cada canal, e cada grafo reflete o resultado da alocação

do canal em questão. Se existir n -clique² no grafo, os canais são alocados a n vértices ao mesmo tempo. A escolha do canal é feita de modo a se permitir o maior número de vértices disponíveis após a alocação. A estratégia 1 -clique apresenta taxa de bloqueio baixa, porém quando há muitas *ERBs* a seleção do canal torna-se demorada.

7.2.2 Estratégias ADC Usando Alocação Otimizada de Canais

Nas estratégias *ADC* convencionais todos os canais são alocados dinamicamente. Assim a distância D de cada canal, em média, é maior que D_r e o número de canais reutilizáveis sob toda a área de serviço é reduzido. As estratégias *ADC* descritas a seguir tentam contornar este problema otimizando a alocação de canais.

A Alocação por Empréstimo de Canais (*AEC*) [20, 21, 22, 23, 45], tanto quanto a *AFC*, fixa os canais nominais para cada *ERB* a intervalos D_r . Se todos os canais nominais da *ERB* em questão estão ocupados, um empréstimo de canal é feito da *ERB* adjacente. Esta estratégia é flexível quanto à demanda de canais e apresenta taxa de bloqueio baixa. Existem diversas variantes desta estratégia, incluindo a proposta de combinação com a *VLB* descrita no Capítulo 6.

A Alocação Híbrida de Canais (*AHC*) [27, 35], similarmente à *AEC*, divide os canais em dois subconjuntos: fixo e dinâmico. Os canais do subconjunto fixo são alocados como em *AFC* para reuso à intervalos D_r . Os canais do subconjunto dinâmico são alocados de acordo com a estratégia *ADC* empregada. A proporção canais *fixos/dinâmicos* influencia a taxa de bloqueio. Esta estratégia requer menos equipamentos RF, e assim há uma diminuição na complexidade do gerenciamento de controle dos canais em relação às estratégias que alocam todos os canais dinamicamente. Uma proposta da *AHC* com *VLB* foi apresentada no Capítulo 6.

A estratégia *Scheduled Channel Assignment* [50] aloca canais para cada célula de acordo com uma tabela que é ajustada levando-se em conta as variações do tráfego tanto no tempo como no espaço. Isto implica uma quantidade conveniente de equipamentos RF,

²Subgrafo completo contendo n vértices.

porém esta estratégia não funciona adequadamente para grandes variações inesperadas de tráfego.

A Alocação Fixa e Dinâmica de Canais [51] é uma combinação da AFC com ADC que tem como objetivo aproveitar a dependência da taxa de bloqueio com relação ao tráfego. Esta estratégia utiliza ADC quando a intensidade de tráfego é baixa, e comuta para AFC quando o tráfego é alto. O tipo de alocação de canal deve ser trocado gradualmente, pois uma transição abrupta entre AFC e ADC acarretaria um bloqueio alto.

7.2.3 Estratégias ADC Usando Monitoração do Canal

Estas estratégias aplicam os resultados da monitoração do canal quanto à interferência co-canal, e não necessitam que o controle do sistema seja centralizado.

Na estratégia Segregação de Canais [10] a escolha do canal é feita pelas ERBs individualmente examinando-se todos os canais para se determinar aqueles que tenham um baixo nível de interferência co-canal. O procedimento deste processo, *carrier sensing*, é realizado em ordem de prioridade. A ordem é estabelecida independentemente em cada ERB levando-se em conta a probabilidade da seleção do canal, e a ordem é atualizada constantemente. Assim a ERB poderia conhecer facilmente os canais selecionáveis e a condição de interferência nas células vizinhas. Portanto os canais estão segregados. As condições de interferência alteram-se quando uma nova ERB é adicionada ou um prédio alto é construído na área de serviço. Em AFC, os canais devem ser realocados. Com segregação de canais, os canais são realocados automaticamente. Para investigar o desempenho desta estratégia, os efeitos da atualização constante devem ser examinados para vários perfis de tráfego.

A estratégia Reuso Flexível [52] estima a disponibilidade do canal através da monitoração da qualidade do canal. A qualidade é influenciada pelas condições de interferência e pela posição das estações móveis na célula. Nas outras estratégias D_r é constante e, além disso, D_r é determinado considerando-se a opção de pior condição. Entretanto no reuso flexível as distâncias de reuso podem ser menores do que D_r de acordo com os re-

sultados da monitoração. Conseqüentemente o reuso do canal em toda a área de serviço seria maior aumentando-se a capacidade de tráfego do sistema. Existem várias estratégias específicas que empregam o conceito do reuso flexível. A simulação feita em [52] mostrou o aumento da capacidade do canal de cinco vezes ou mais em relação à AFC para uma taxa de bloqueio de 3%. Entretanto, com reuso flexível, a interferência em cada canal deve ser corretamente estimada e monitorada. Quando as estações móveis movem-se rapidamente, os canais são trocados freqüentemente em razão da diminuição da distância de reuso do canal.

7.3 Propostas ADC e Rearranjo

As cinco propostas ADC apresentadas a seguir pertencem às classes 1 e 2 da Tabela 7.1, ou seja, são estratégias tentando otimizar a alocação de canais mas que também incluem em suas regras de decisão aquelas das técnicas ADC convencionais. O que diferencia as propostas deste trabalho em relação às classes 1 e 2 é a maneira de alocar o canal com o intuito de se obter a menor distância de reuso, além do rearrranjo no momento da liberação do canal.

De fato, o princípio básico destas propostas é tentar utilizar os canais dinâmicos de maneira a mais compactada possível de forma a se minimizar o impedimento de canais e, conseqüentemente, seus efeitos. Devido ao uso disciplinado dos canais dinâmicos, à medida que o tráfego aumenta, o sistema evolui para um padrão fixo de reuso. Desta forma combinam-se os efeitos da alocação dinâmica para baixo tráfego e aqueles da alocação fixa para alto tráfego.

Em determinadas condições, como mencionado anteriormente, os algoritmos propostos aqui fazem uso de decisões baseadas nas ADC convencionais. Escolheu-se, para isto, o ADC de classe 1, *First Available*, por sua simplicidade. O desempenho destas técnicas será, então, avaliado em relação a AFC e a ADC - FA. Sem dúvida, outros algoritmos ADC poderiam ser incorporadas às propostas em substituição àquele aqui explorado.

7.3.1 Definições e Princípios Básicos ADC

Seja S , $I(v)$, e $C_{D_r}(v)$, respectivamente, o conjunto de todas as células da área de serviço, o conjunto das células interferentes da célula v , e o conjunto das células com distância mínima de reuso D_r em relação à célula v . $I(v)$ não inclui v . Como foi visto anteriormente no Capítulo 3, a origem das chamadas é aleatória e a probabilidade de duas ou mais chamadas ocorrerem ao mesmo tempo é desprezível em relação à ocorrência de nenhuma ou somente uma chamada. Assim considera-se a alocação de um canal por evento, i.e, uma única chamada é originada por vez.

Seja $v_a \in S$ e U_i , respectivamente, a célula onde ocorre uma nova chamada e o conjunto das células no qual o canal i já está alocado. Em ADC, antes de alocarmos o canal i para a nova chamada na célula v_a devemos confirmar se $v_a \notin U_i$ e $I(v_a) \cap U_i = \emptyset$. A nova chamada é bloqueada se $v_a \in U_i$ ou $I(v_a) \cap U_i \neq \emptyset \forall i$.

7.3.2 Proposta A: Maior Número de Co-Células na Distância Mínima de Reuso

Esta proposta pesquisa o estado dos canais usados nas outras células com distância mínima de reuso, ou seja

$$Z_i(v_a) = U_i \cap C_{D_r}(v_a) \quad (7.1)$$

é obtido para todo canal i , onde $v_a \notin U_i$ e $I(v_a) \cap U_i = \emptyset$. O conjunto $Z_i(v_a)$ fornece as co-células de v_a com distância D_r utilizando o canal i . O canal é escolhido em ordem decrescente de $|Z_i(v_a)|$. Seja $X_i(v_a)$ o conjunto das células interferentes de v_a onde o canal i está impedido

$$X_i(v_a) = \left\{ \bigcup_{v_j \in Z_i(v_a)} I(v_j) \right\} \cap I(v_a) \quad (7.2)$$

Portanto a alocação do canal i em v_a não afeta o número de canais disponíveis das células interferentes de v_a em $X_i(v_a)$. Assim, $Z_i(v_a)$ afeta $X_i(v_a)$, i.e, quanto maior $Z_i(v_a)$ maior $X_i(v_a)$. Ao escolhermos um canal em ordem decrescente de $|Z_i(v_a)|$, estamos indiretamente otimizando o número de canais disponíveis em $I(v_a)$. O valor máximo de

$|X_i(v_a)|$ é $|I(v_a)|$. Seja $K_i(v_a)$ o conjunto das células interferentes de v_a onde o canal i será impedido ao se alocar o canal i em v_a

$$K_i(v_a) = I(v_a) - X_i(v_a). \quad (7.3)$$

Alocado o canal i em v_a diminui o número de canais disponíveis das células em $K_i(v_a)$ e o número de canais disponíveis das células em $X_i(v_a)$ permanece inalterado. Quanto maior $X_i(v_a)$, menor $K_i(v_a)$ e maior a quantidade de células interferentes de v_a que permanecem com o mesmo número de canais disponíveis.

Quando $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ onde $v_a \notin U_i$ e $I(v_a) \cap U_i = \emptyset$, aloca-se o primeiro canal j onde $v_a \notin U_j$ e $I(v_a) \cap U_j = \emptyset$. Note que esta proposta é uma AFC quanto à distância de reuso, pois sempre teremos D_r quando $Z_i(v_a) \neq \emptyset$, e uma ADC FA quando $Z_i(v_a) = \emptyset$.

7.3.3 Proposta B: Bloqueio Forçado

Esta proposta mantém um controle rígido sobre a distância de reuso. A distância de reuso entre as co-células sempre será D_r .

O algoritmo é o mesmo daquele da proposta A sempre que $\max |Z_i(v_a)| > 0$, onde $1 \leq i \leq N$, $v_a \in S$, e N é o número total de canais do sistema. Nesta situação, como visto anteriormente, a distância de reuso entre as co-células é D_r . Quando $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ aloca-se o primeiro canal que satisfaça a condição

$$U_i = \emptyset \quad (7.4)$$

ou seja, um canal que não esteja sendo usado por qualquer célula da área de serviço.

Observe que uma chamada será bloqueada em v_a se $Z_i(v_a) = \emptyset$ e $U_i \neq \emptyset \forall i$ mesmo que haja algum canal j onde $v_a \notin U_j$ e $I(v_a) \cap U_j = \emptyset$. Ao contrário da proposta A, esta estratégia é uma AFC o tempo inteiro quanto à distância de reuso, i.e., $D = D_r$.

7.3.4 Proposta C: Bloqueio Forçado pelo Grau de Serviço

Esta proposta, como as anteriores, procura o canal i tal que $\max |Z_i(v_a)| > 0$ onde $v_a \notin U_i$ e $I(v_a) \cap U_i = \emptyset$. Se $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ e $B_m(v_a) \leq n$, onde $B_m(v_a)$ é o bloqueio

médio de v_a e n é o grau de serviço do sistema, aloca-se o primeiro canal j onde $v_a \notin U_j$ e $I(v_a) \cap U_j = \emptyset$. Se $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ e $B_m(v_a) > n$ aloca-se o primeiro canal que satisfaça a condição $U_i = \emptyset$.

Quando o bloqueio da célula for maior que o grau de serviço, qualquer chamada desta célula será bloqueada em v_a se $Z_i(v_a) = \emptyset$ e $U_i \neq \emptyset \forall i$ mesmo que haja algum canal j onde $v_a \notin U_j$ e $I(v_a) \cap U_j = \emptyset$.

7.3.5 Proposta D: Bloqueio Forçado pelos Canais Impedidos

Quando empregamos AFC num sistema com padrão de reuso r o número de *canais impedidos* em cada célula é $(r-1)/r N$, onde N é o número total de canais do sistema.

Esta proposta procura o canal i tal que $\max |Z_i(v_a)| > 0$ onde $v_a \notin U_i$ e $I(v_a) \cap U_i = \emptyset$. Se $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ e $\frac{C_I(v_a)}{N} \leq \frac{r-1}{r}$, onde $C_I(v_a)$ é o número de *canais impedidos* de v_a , aloca-se o primeiro canal j onde $v_a \notin U_j$ e $I(v_a) \cap U_j = \emptyset$. Se $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ e $\frac{C_I(v_a)}{N} > \frac{r-1}{r}$ aloca-se o primeiro canal que satisfaça a condição $U_i = \emptyset$.

Quando a taxa dos canais impedidos da célula for maior do que $(r-1)/r N$, qualquer chamada desta célula será bloqueada em v_a se $Z_i(v_a) = \emptyset$ e $U_i \neq \emptyset \forall i$ mesmo que haja algum canal j onde $v_a \notin U_j$ e $I(v_a) \cap U_j = \emptyset$.

Note que esta estratégia é semelhante à *proposta C* a menos do ponto de decisão. A *proposta C* baseia-se no grau de serviço enquanto que esta estratégia apóia-se na relação de *canais impedidos* obtida da AFC.

7.3.6 Proposta E: FA para Baixo Tráfego e Bloqueio Forçado para Alto Tráfego

Esta proposta emprega a estratégia FA (*First Available*) enquanto o bloqueio médio da célula é menor ou igual ao grau de serviço, $B_m(v_a) \leq n$. Quando $B_m(v_a) > n$, a proposta procura o canal i tal que $\max |Z_i(v_a)| > 0$ onde $v_a \notin U_i$ e $I(v_a) \cap U_i = \emptyset$. Se $Z_i(v_a) = \emptyset \forall i$ aloca-se o primeiro canal que satisfaça a condição $U_i = \emptyset$.

Observe que esta estratégia é uma combinação da FA com a *proposta B*. Empregamos

FA enquanto o grau de serviço da célula está sendo satisfeito e mudamos para a *proposta B* quando o grau de serviço se deteriora, pois a *proposta B* tenta manter a mínima distância de reuso aproximando-se do desempenho da *AFC* para alto tráfego.

7.3.7 Rearranjo

Ao contrário das propostas conhecidas na literatura onde o rearranjo é empregado no atendimento de uma nova chamada, o rearranjo aqui sugerido ocorre quando do término de uma chamada.

Seja

$$W_i(v_a) = U_i \cap C_{D_r}(v_a) \quad (7.5)$$

onde $v_a \in U_i$. O conjunto $W_i(v_a)$ fornece as co-células de v_a com distância D_r que estão utilizando o canal i . Suponha que uma chamada em v_a utilizando o canal j tenha terminado, e admita que k seja o canal que forneça o menor valor de co-células ativas, i.e., $W_k(v_a) = \min |W_i(v_a)| \forall i$ onde $v_a \in U_i$, $1 \leq i \leq N$ ($i \neq j$). Haverá o rearranjo de uma chamada em curso atendida pelo canal k para o canal j liberado em v_a se

$$W_k(v_a) < W_j(v_a) \quad (7.6)$$

Portanto, neste rearranjo sempre tentamos buscar o maior número de co-células ativas que estejam usando o mesmo canal na distância mínima de reuso. Observe que ao empregarmos o rearranjo estamos aumentando $X_i(v_a)$ e diminuindo $K_i(v_a)$, ocasionando uma quantidade maior de células interferentes de v_a que permanecem com o mesmo número de canais disponíveis.

Todas as propostas empregam o rearranjo, porém a *proposta C* e *E* utilizam o rearranjo somente a partir do momento em que o bloqueio médio da célula supera o grau de serviço, i.e., $B_m(v_a) > n$.

7.4 Resultados

As cinco propostas utilizando a *ADC* foram aplicadas ao sistema infinito descrito na Seção 3.5.1 onde consideramos 105 canais e o tráfego inicial mostrado na Figura 3.6. O grau de serviço n adotado para as estratégias que necessitam desta especificação foi de 5%. Além disso o padrão de reuso r utilizado foi o de 7.

Nesta seção mostraremos alguns resultados da probabilidade do bloqueio médio em função da carga de tráfego além do parâmetro de desbalanceamento.

A Figura 7.3 mostra o bloqueio versus o tráfego normalizado para a proposta A.

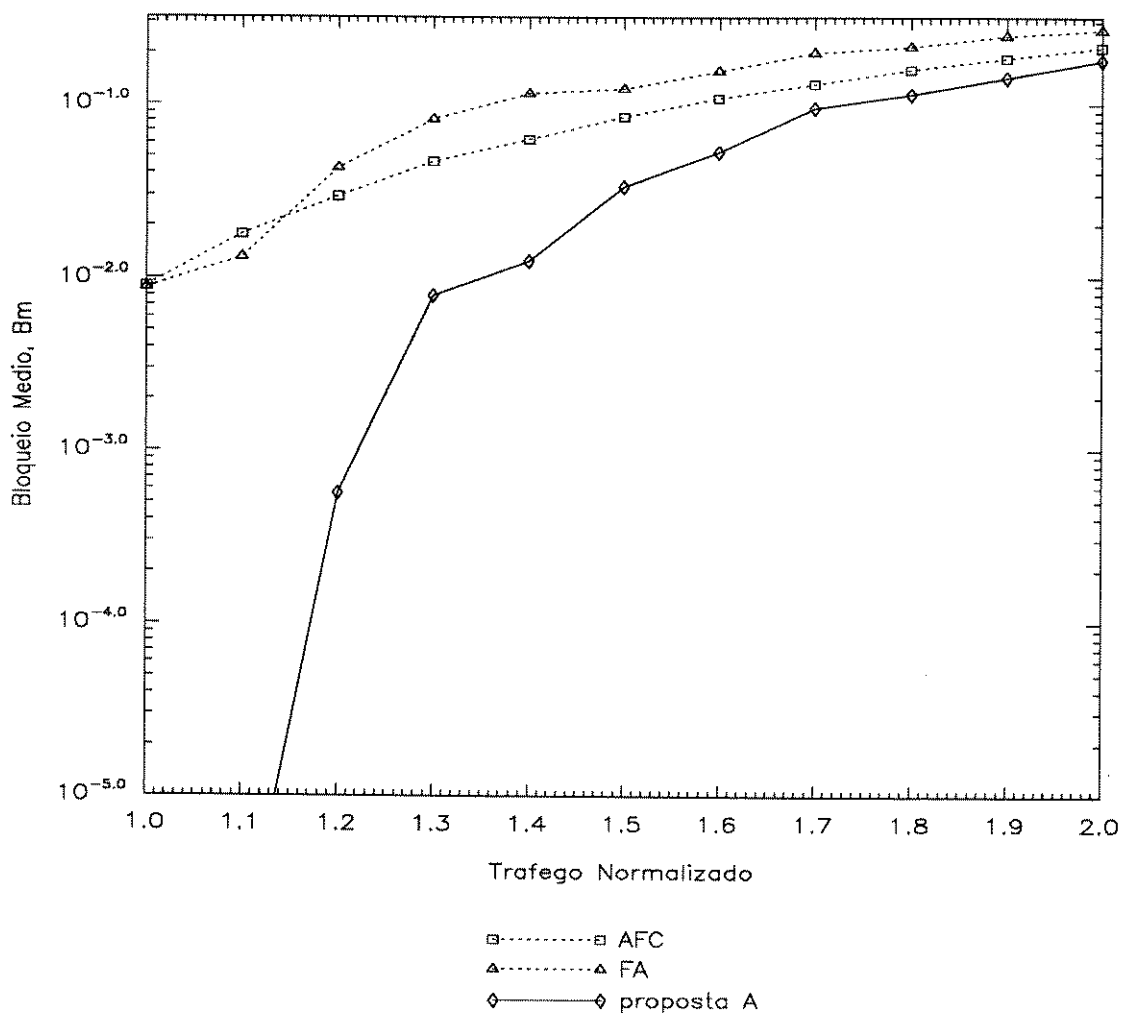


Figura 7.3: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: Maior Número de Co-Células na Distância Mínima de Reuso.

Note que a proposta A possui um bloqueio médio menor do que a AFC ou FA, sendo mais significativo para baixo tráfego. Observe ainda que ela tende a AFC para alto tráfego.

A Figura 7.4 mostra o bloqueio versus o tráfego normalizado para a proposta B.

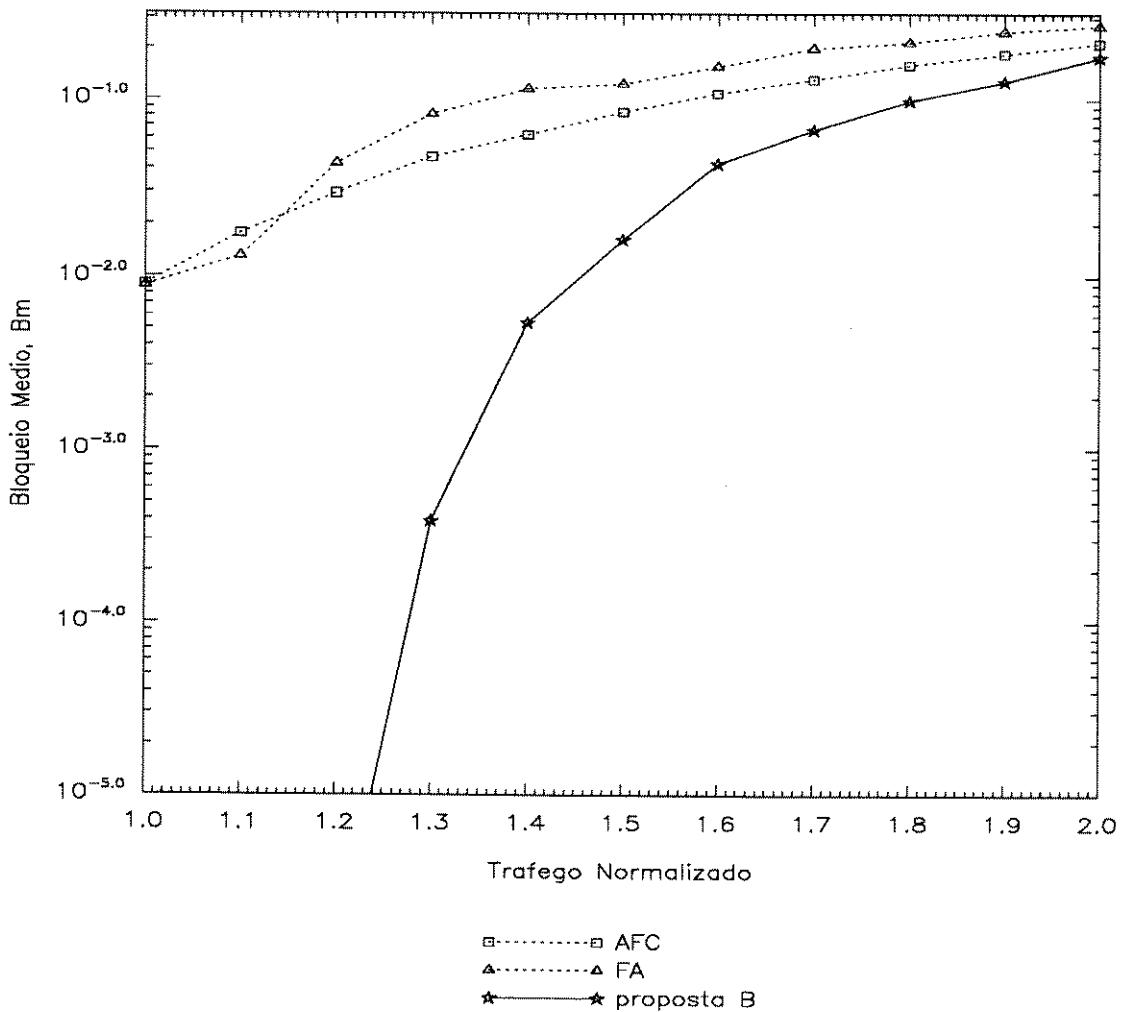


Figura 7.4: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: Bloqueio Forçado.

Note que o bloqueio forçado possui o mesmo comportamento da proposta anterior, inclusive apresentando um melhor desempenho do que a proposta do maior número de co-células na distância mínima de reuso.

A Figura 7.5 mostra o bloqueio versus o tráfego normalizado para a proposta C, i.e.,

bloqueio forçado pelo grau de serviço.

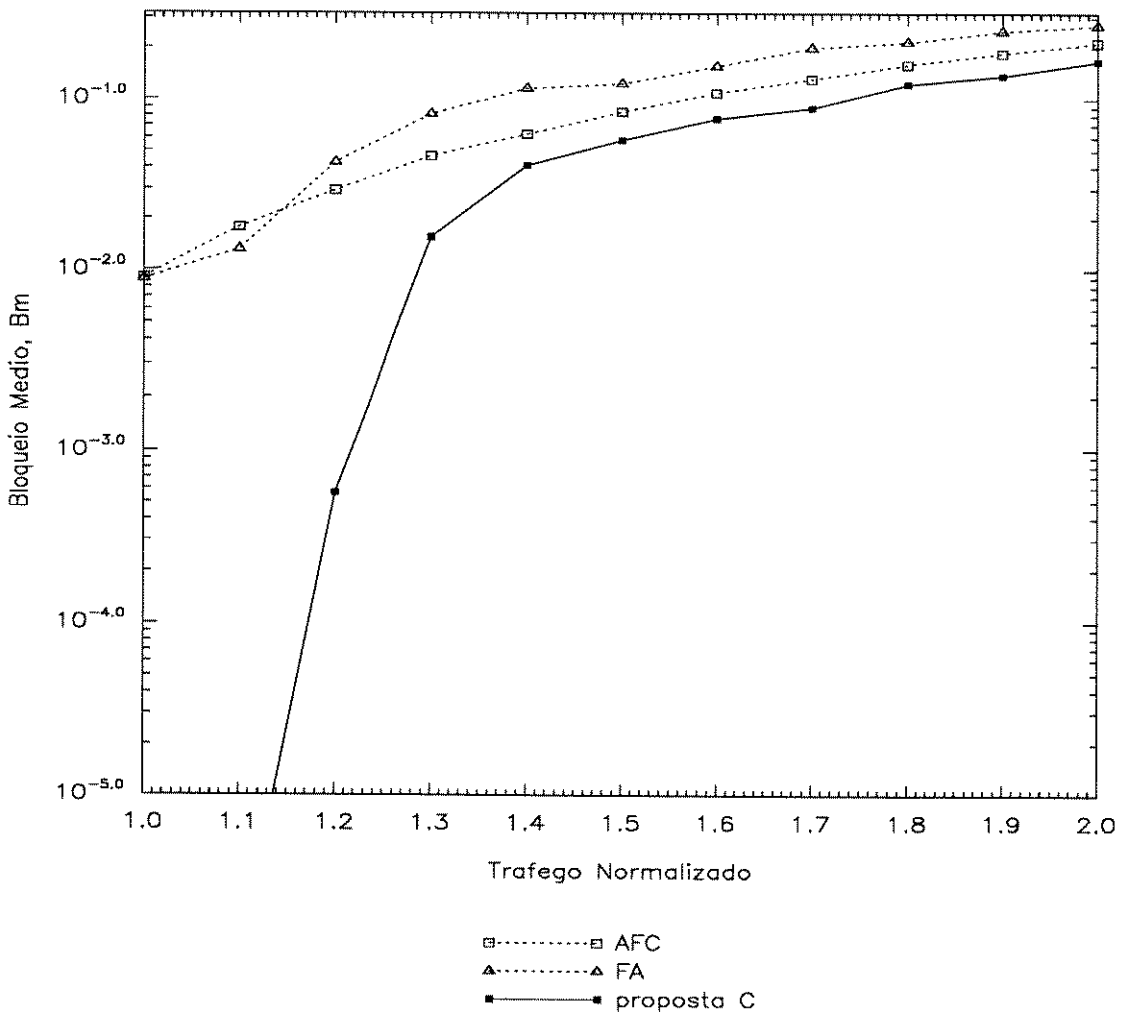


Figura 7.5: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: Bloqueio Forçado pelo Grau de Serviço.

Note que o bloqueio forçado pelo grau de serviço apresenta o mesmo comportamento do bloqueio forçado. Entretanto o bloqueio forçado puro mostra um desempenho superior em relação ao bloqueio forçado pelo grau de serviço. Isto demonstra que a distância de reuso contribui substancialmente no desempenho do sistema para baixo tráfego, o que não ocorre de maneira contundente para alto tráfego.

A Figura 7.6 mostra o bloqueio versus o tráfego normalizado para a proposta D, i.e,

bloqueio forçado pelos canais impedidos.

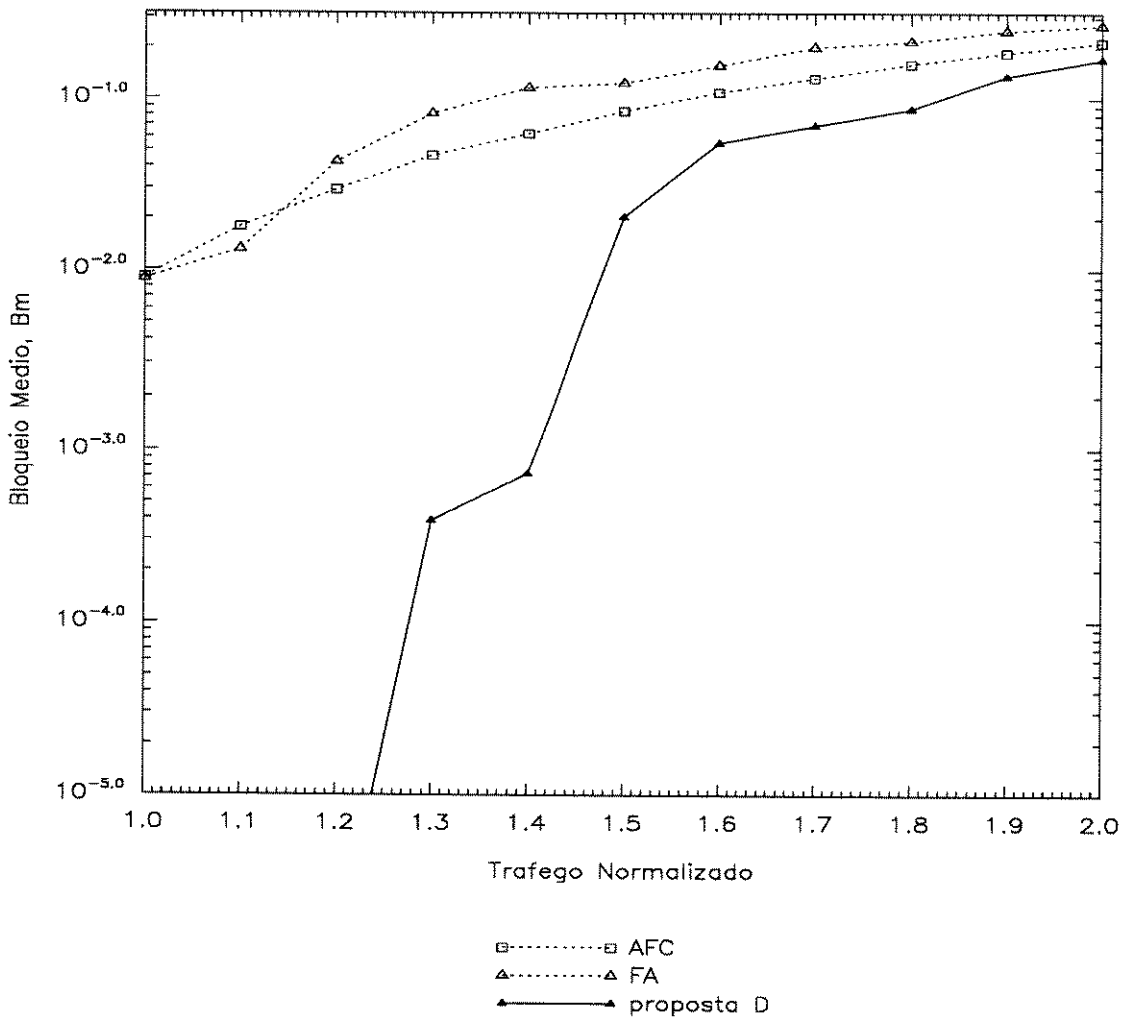


Figura 7.6: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: Bloqueio Forçado pelos Canais Impedidos.

Observe que esta proposta é também um bloqueio forçado como as anteriores (*B* e *C*) baseada na proporção de canais impedidos. Ela apresenta um desempenho melhor do que a proposta *C* e performance semelhante àquela da proposta *B*.

A Figura 7.7 mostra o bloqueio versus o tráfego normalizado para a proposta *E*, i.e., *FA* para baixo tráfego com bloqueio forçado para alto tráfego.

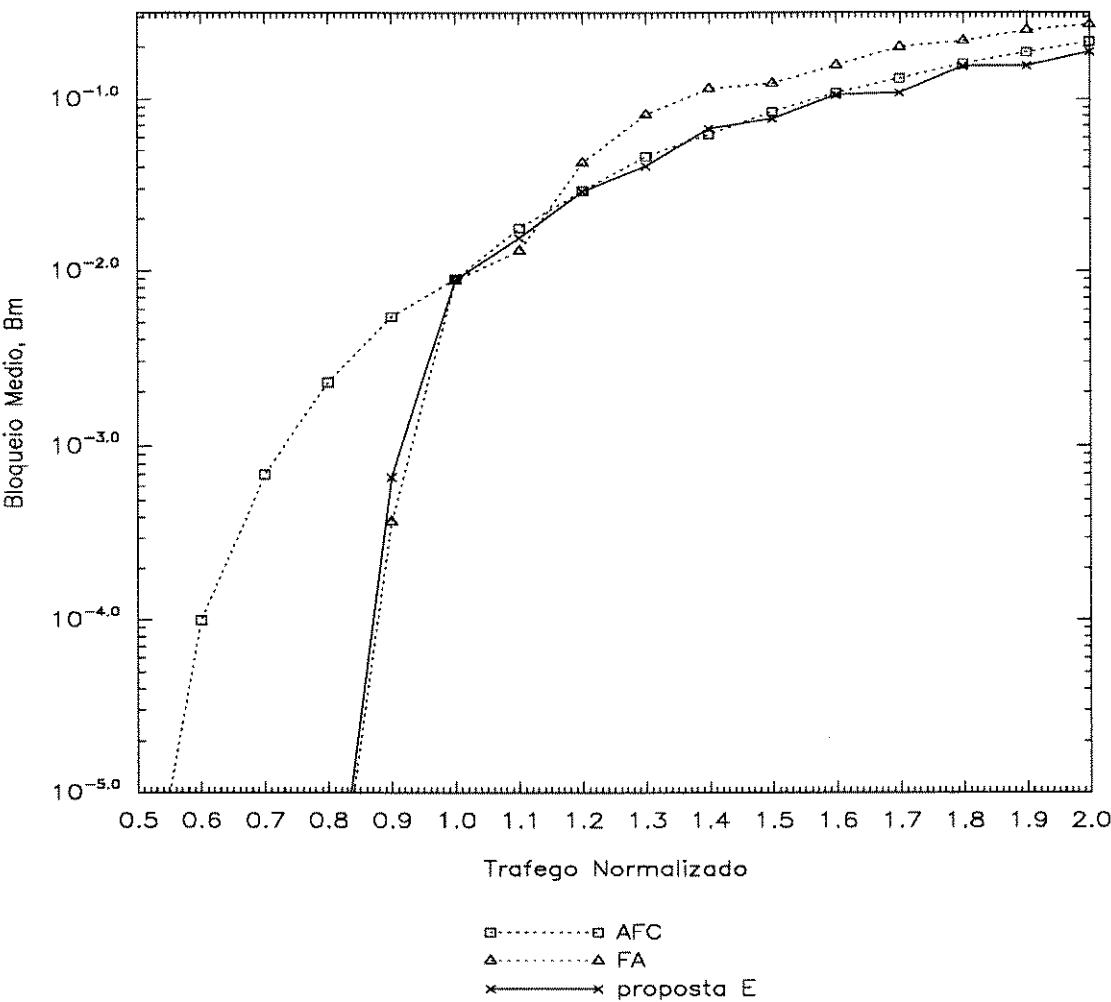


Figura 7.7: Bloqueio médio versus tráfego normalizado: FA para Baixo Tráfego com Bloqueio Forçado para Alto Tráfego.

Observe que para baixo tráfego o comportamento é praticamente idêntico àquele da FA, mas para médio e alto tráfego o desempenho segue aquele da AFC.

A Figura 7.8 mostra todas as curvas num mesmo gráfico a título de comparação entre os algoritmos propostos neste Capítulo.

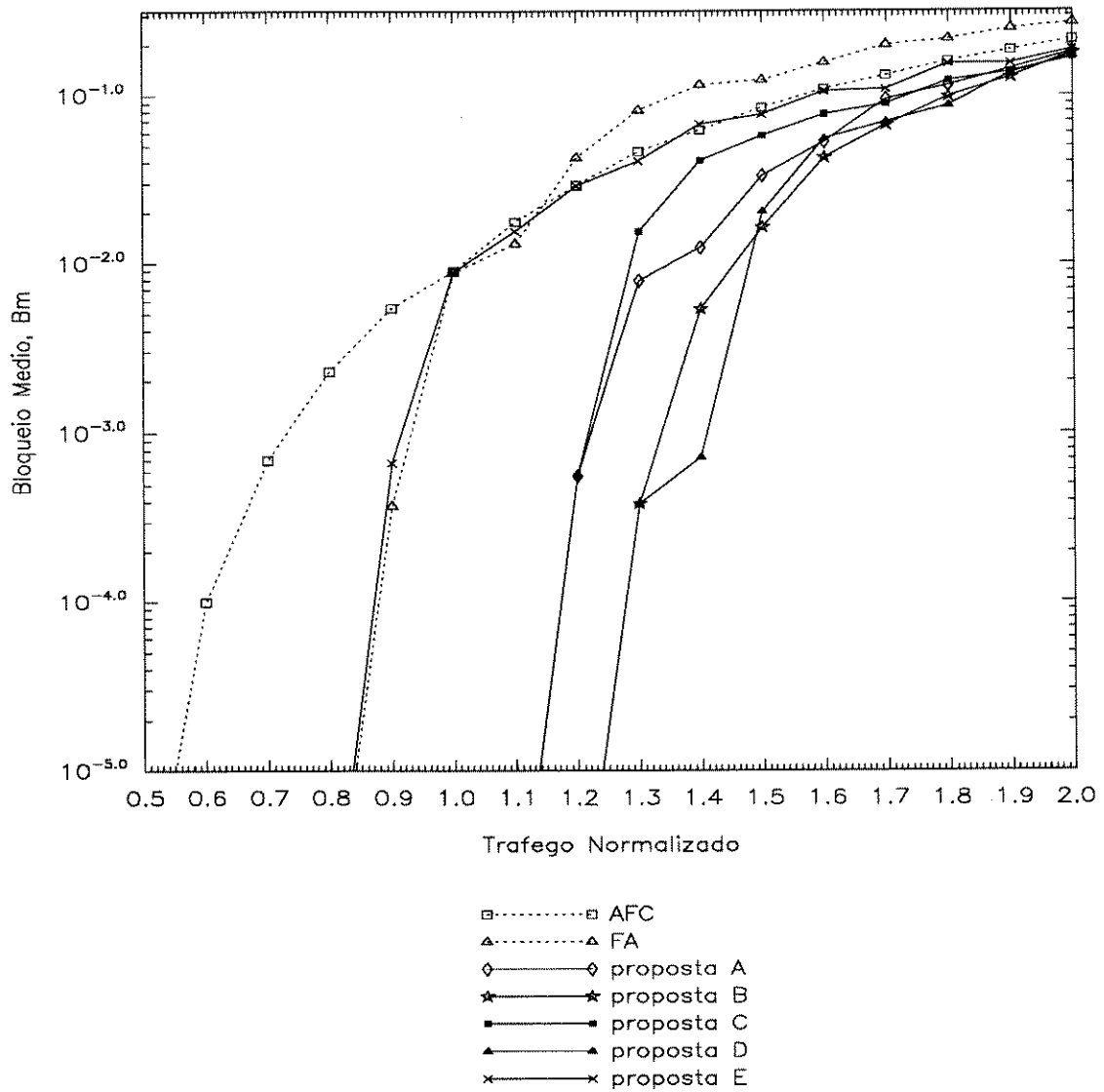


Figura 7.8: Bloqueio médio versus tráfego normalizado

Observe que para baixo tráfego todas as propostas *ADC* possui um bloqueio médio bastante inferior àquele da *AFC*, sendo a proposta *B* e *D* a melhor delas, seguidas da proposta *C*, *A*, e *E*.

Para médio tráfego todas as propostas, exceto a *E*, apresenta ainda um ganho razoável em relação ao bloqueio médio, sendo em média, a proposta *B* aquela que exibe o melhor desempenho seguida da proposta *D*, *A* e *C*. A proposta *E* apresenta praticamente o mesmo desempenho daquele da *AFC*.

Para alto tráfego todas as propostas, a menos da *E*, mostra ainda um ganho quanto ao bloqueio médio. A tendência das curvas é coincidir com aquela da *AFC*, o que está coerente com o que foi apresentado na seção anterior. Mantendo-se a menor distância de reuso nas co-células, principalmente para alto tráfego, as propostas comportam-se como *AFC*.

Note que a *FA*, e de fato todas as estratégias *ADC* disponíveis na literatura, levam a uma performance desastrosa para alto tráfego, o que não se verifica com as propostas deste trabalho. Isto é, sem dúvida, uma característica bastante interessante destas propostas. Os canais são alocados dinamicamente, mas de uma maneira disciplinada, tal que a eficiência espectral é mantida tanto para baixo tráfego como para alto tráfego.

A Tabela 7.2 mostra a evolução do desbalanceamento com o aumento do tráfego para as cinco técnicas sob investigação.

tráfego (A)	AFC	FA	proposta A	proposta B	proposta C	proposta D	proposta E
1.0	0.017842	0.018784	0.021677	0.021677	0.021677	0.021677	0.016017
1.1	0.015594	0.016118	0.019741	0.019585	0.019741	0.019741	0.014870
1.2	0.013368	0.019094	0.016855	0.019585	0.015083	0.019585	0.016075
1.3	0.016121	0.014179	0.017890	0.016258	0.016636	0.016558	0.016929
1.4	0.012323	0.017477	0.016011	0.013420	0.016819	0.018445	0.014572
1.5	0.011972	0.014470	0.013543	0.013514	0.015608	0.013748	0.017634
1.6	0.009220	0.012915	0.011389	0.010181	0.012573	0.013176	0.017816
1.7	0.009334	0.011439	0.013368	0.014452	0.016615	0.014393	0.013926
1.8	0.006461	0.012376	0.013079	0.012763	0.017524	0.011591	0.013586
1.9	0.006138	0.014013	0.014750	0.012264	0.016533	0.010526	0.010864
2.0	0.006339	0.012888	0.011890	0.011631	0.013999	0.012560	0.011653

Tabela 7.2: Evolução do desbalanceamento com o aumento do tráfego

Note que, em média, os sistemas tendem a uma melhora na condição de balanceamento com o aumento do tráfego.

7.5 Sumário e Conclusões

Neste Capítulo foram propostas cinco novas *Técnicas Globais de Alocação*: Maior Número de Co-Células na Distância Mínima de Reuso (*proposta A*), Bloqueio Forçado (*proposta B*), Bloqueio Forçado pelo Grau de Serviço (*proposta C*), Bloqueio Forçado pelos Canais Impedidos (*proposta D*), e FA para Baixo Tráfego e Bloqueio Forçado para Alto Tráfego (*proposta E*).

A proposta *A* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição, aloca-se o primeiro canal disponível.

A proposta *B* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição, seleciona-se um canal que não esteja sendo utilizado por nenhuma célula. Se esta nova procura também for infrutífera, a chamada será bloqueada mesmo que haja canais disponíveis na célula, ou seja, ocorre o bloqueio forçado.

A proposta *C* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição e o bloqueio médio da célula estiver satisfazendo o grau de serviço, aloca-se o primeiro canal disponível. Caso o bloqueio médio da célula seja maior que o grau de serviço, busca-se um canal que não esteja sendo utilizado por nenhuma célula. Note que esta técnica é a proposta *A* enquanto o bloqueio médio da célula for menor do que o grau de serviço, e torna-se a proposta *B* quando o bloqueio médio da célula for maior que o grau de serviço.

A proposta *D* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição e a proporção de canais impedidos pelo número total

de canais for menor do que $(r-1)/r$, sendo r o padrão de reuso, aloca-se o primeiro canal disponível. Caso a proporção seja maior que $(r-1)/r$, busca-se um canal que não esteja sendo utilizado por nenhuma célula. A diferença entre esta técnica e a proposta C está apenas no parâmetro de decisão. Enquanto que a proposta C utiliza o grau de serviço, esta técnica emprega a mesma proporção da AFC de canais impedidos pelo número total de canais $((r-1)/r)$.

A proposta E procura o primeiro canal disponível enquanto o grau de serviço da célula estiver sendo satisfeito. Quando o bloqueio médio da célula for maior do que o grau de serviço a técnica adota a proposta B .

O ganho obtido com as técnicas é altamente significativo para baixo tráfego, fornecendo melhora de até 4 ou 5 na ordem de grandeza. Mesmo para médio tráfego o ganho ainda é substancial. Para alto tráfego a tendência das técnicas propostas é acompanhar o desempenho da AFC .

O fator determinante que resultou num ganho tão substantivo para baixo e médio tráfego foi a maximização da utilização do mesmo canal nas co-células mais próximas. Note que as propostas que utilizaram isso conseguiram um alto desempenho para baixo e médio tráfego. A proposta E foi a única a não empregar tal condição para baixo e médio tráfego e, previsivelmente, foi aquela que teve o pior desempenho nestas condições de tráfego.

A complexidade destas propostas é maior do que a FA pela pesquisa dos estados dos canais nas células interferentes e nas células com distâncias maiores ou iguais a distância mínima de reuso. Entretanto o aumento de desempenho que se ganha para baixo e médio tráfego compensa esta dificuldade na implementação destes algoritmos, exceto a proposta E que não possui nenhum ganho. De fato, uma das grandes vantagens destas propostas é que a eficiência espectral é otimizada tanto para baixo tráfego quanto para alto tráfego. Ao contrário das estratégias ADC disponíveis na literatura, que têm um bom desempenho para baixo tráfego e desastroso para alto tráfego, as propostas deste trabalho apresentam um notável desempenho em qualquer situação.

Capítulo 8

Conclusões

Este Capítulo tem por objetivo apresentar as principais conclusões da pesquisa descrita neste trabalho de tese. Ressaltam-se ainda as contribuições e propostas para trabalhos futuros.

8.1 Introdução

Em sistemas de comunicação sem fio, algoritmos de alocação de canais constituem um dos fatores de maior influência na eficiência espectral. Dentre os algoritmos investigados na literatura parte relaciona-se com técnicas que manipulam o tráfego com acesso a mais de uma estação rádio base, disponível na fronteira entre células, e parte manipula dinamicamente o tráfego global do sistema. Ao primeiro grupo pertencem as Técnicas Locais de Alocação - *TLA*; enquanto que ao segundo pertencem as Técnicas Globais de Alocação (*TGA*).

Este trabalho de tese investigou tanto as *TLA* quanto as *TGA* em que foram propostas algoritmos de rearranjo de chamadas, combinação de técnicas, e novas técnicas. Das técnicas locais trabalhou-se com a Variação do Limiar de Bloqueio [8] enquanto que das técnicas globais os algoritmos de alocação dinâmica, em suas várias formas, foram investigadas.

8.2 Conclusões Gerais

Variação do Limiar de Bloqueio, uma estratégia que utiliza o tráfego com rádio acesso a mais de uma estação base, foi investigada. Consideraram-se três sistemas celulares: infinito balanceado, infinito desbalanceado, e real. A VLB pode ser considerada como uma generalização da técnica Directed Retry [9]. Na VLB a decisão para desviar a chamada flexível para a célula de segunda opção é baseada no valor de limiar L_i da célula i , positivo e inteiro, escolhido como um parâmetro de projeto. Chamadas flexíveis são desviadas para fora da célula de primeira opção no caso em que o número de canais ocupados exceder o limiar L_i da célula i e a célula de segunda opção estiver com mais canais livres. Um procedimento de rearranjo de chamadas foi proposto e implementado e os procedimentos, quanto à decisão, foram baseados também na estratégia VLB. Portanto, a estratégia é aplicada sempre que uma chamada surge, seja ela flexível ou não.

Observou-se que o uso da estratégia aumenta substancialmente a capacidade de tráfego do sistema. Quanto menor o limiar L_i menor a probabilidade de bloqueio, com seu mínimo atingido em $L_i = 0 \forall i$. Entretanto, em termos práticos, sistemas onde as células operam com um limiar tão alto quanto $80\%N_i$, onde N_i é o número de canais na célula i , fornecem uma performance muito semelhante àquela obtida pelos sistemas onde o limiar é igual a zero. Um limiar zero simplifica o procedimento de encaminhamento alternativo, com um parâmetro a menos a ser considerado. Em tais casos, entretanto, em média, os níveis de interferência experimentados pelos usuários aumentarão em decorrência da permissão de mais chamadas empregando canais com qualidade de transmissão próximo do nível crítico. Um limiar alto mantém as chamadas flexíveis dentro das suas próprias células, e uma melhor qualidade de transmissão é experimentada.

O uso do rearranjo de chamadas utilizando também as regras de decisão da técnica Variação do Limiar de Bloqueio provou ser bastante eficaz, dando um ganho de tráfego substancial.

Nesta tese propôs-se também a combinação de Técnicas Globais de Alocação e Técnicas Locais de Alocação. As técnicas pertencentes a estes dois grupos têm sido investigadas

de forma isolada sendo que tem-se concebido exclusividade de aplicação das técnicas. Ou seja, uma vez decidido pelo uso de uma técnica em um grupo todas as demais do outro grupo estarão automaticamente excluídas. Este trabalho propôs exatamente a combinação destas técnicas.

Em particular utilizaram-se em TGA a Alocação por Empréstimo de Canais, a Alocação Híbrida de Canais, e o *Channel Borrowing Without Locking*, e em TLA a Variação do Limiar de Bloqueio.

A técnica em TGA original é obtida a partir da técnica combinada para flexibilidade nula e/ou para um limiar de bloqueio superior ao número de canais da célula. Da mesma forma, a técnica em TLA pode ser obtida fazendo-se a técnica em TGA tender à alocação fixa de canais AFC através da manipulação conveniente de seus parâmetros.

O ganho obtido com a técnica combinada é de fato substancial. Quanto menor o limiar L_i menor a probabilidade de bloqueio, com seu mínimo atingido em $L_i = 0$. Existem diferenças entre as três combinações. Enquanto que na alocação por empréstimo de canais e na CBWL o comportamento é muito semelhante àquele da alocação fixa quando empregamos a VLB, o mesmo não ocorre na alocação híbrida. A variação de L_i praticamente não afeta o desempenho do sistema e, além disso, o efeito do rearranjo de chamadas é quase insignificante, embora, como já mencionado, a técnica combinada forneça resultados melhores do que as técnicas individuais.

Um aumento de complexidade devido à combinação é obviamente esperado, mas, devido a que os algoritmos em TLA são razoavelmente simples, acredita-se que a complexidade global seja ditada predominantemente por aquela inerente a do algoritmo em TGA. Por outro lado o aumento do ganho da combinação é bem maior do que os ganhos individuais.

Nesta tese também foram propostas cinco novas *Técnicas Globais de Alocação*: Maior Número de Co-Células na Distância Mínima de Reuso (*proposta A*), Bloqueio Forçado (*proposta B*), Bloqueio Forçado pelo Grau de Serviço (*proposta C*), Bloqueio Forçado pelos Canais Impedidos (*proposta D*), e FA para Baixo Tráfego e Bloqueio Forçado para Alto Tráfego (*proposta E*).

A proposta *A* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição, aloca-se o primeiro canal disponível.

A proposta *B* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição, seleciona-se um canal que não esteja sendo utilizado por nenhuma célula. Se esta nova procura também for infrutífera, a chamada será bloqueada mesmo que haja canais disponíveis na célula, ou seja, ocorre o bloqueio forçado.

A proposta *C* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição e o bloqueio médio da célula estiver satisfazendo o grau de serviço, aloca-se o primeiro canal disponível. Caso o bloqueio médio da célula seja maior que o grau de serviço, busca-se um canal que não esteja sendo utilizado por nenhuma célula. Note que esta técnica é a proposta *A* enquanto o bloqueio médio da célula for menor do que o grau de serviço, e torna-se a proposta *B* quando o bloqueio médio da célula for maior que o grau de serviço.

A proposta *D* procura, dentre os canais disponíveis de uma dada célula, o canal que estiver sendo utilizado o maior número de vezes nas co-células mais próximas. Caso não haja nenhum canal nessa condição e a proporção de canais impedidos pelo número total de canais for menor do que $(r-1)/r$, sendo r o padrão de reuso, aloca-se o primeiro canal disponível. Caso a proporção seja maior que $(r-1)/r$, busca-se um canal que não esteja sendo utilizado por nenhuma célula. A diferença entre esta técnica e a proposta *C* está apenas no parâmetro de decisão. Enquanto que a proposta *C* utiliza o grau de serviço, esta técnica emprega a mesma proporção da AFC de canais impedidos pelo número total de canais $((r-1)/r)$.

A proposta *E* procura o primeiro canal disponível enquanto o grau de serviço da célula estiver sendo satisfeito. Quando o bloqueio médio da célula for maior do que o grau de serviço a técnica adota a proposta *B*.

O ganho obtido com as técnicas é altamente significativo para baixo tráfego, fornecendo

melhora de até 4 ou 5 na ordem de grandeza. Mesmo para médio tráfego o ganho ainda é substancial. Para alto tráfego a tendência das técnicas propostas é acompanhar o desempenho da *AFC*.

O fator determinante que resultou num ganho tão substantivo para baixo e médio tráfego foi a maximização da utilização do mesmo canal nas co-células mais próximas. As propostas que utilizaram isso conseguiram um alto desempenho para baixo e médio tráfego. A proposta *E* foi a única a não empregar tal condição para baixo e médio tráfego e, previsivelmente, foi aquela que teve o pior desempenho nestas condições de tráfego. A complexidade destas propostas é maior do que a *FA* pela pesquisa dos estados dos canais nas células interferentes e nas células com distâncias maiores ou iguais à distância mínima de reuso. Entretanto o aumento de desempenho que se ganha para baixo e médio tráfego compensa esta dificuldade na implementação destes algoritmos, exceto a proposta *E* que não possui nenhum ganho. De fato, uma das grandes vantagens destas propostas é que a eficiência espectral é otimizada tanto para baixo tráfego quanto para alto tráfego. Ao contrário das estratégias *ADC* disponíveis na literatura, que têm um bom desempenho para baixo tráfego e desastroso para alto tráfego, as propostas deste trabalho apresentam um notável desempenho em qualquer situação.

As propostas deste trabalho poderiam ser empregadas tanto no sistema analógico *AMPS* como no sistema digital *TDMA* ou *GSM*.

8.3 Contribuições do Trabalho

Este trabalho de tese propôs diversos algoritmos de alocação de canais com o objetivo de melhorar o desempenho de tráfego de sistemas rádio móveis, incluindo também procedimento de rearranjo de chamadas. As principais contribuições incluem:

- Proposta de um parâmetro de auxílio - o desbalanceamento - constituindo uma escala de 0 a 1 que avalia o nível de desbalanceamento de tráfego do sistema.

- Proposta de um algoritmo de rearranjo de chamadas para técnicas locais de alocação de canais.
- Proposta de algoritmos onde se combinam técnicas globais de alocação e técnicas locais de alocação de canais.
- Proposta de técnicas globais de alocação em que combinam-se as vantagens dos algoritmos de alocação dinâmica com os de alocação fixa sendo que o algoritmo final migra de uma para outra técnica dinamicamente com a variação da distribuição de tráfego.
- Proposta de um algoritmo de rearranjo de chamadas para técnicas globais de alocação de canais.

8.4 Trabalhos Futuros

A área de teletráfego aplicado às comunicações sem fio é vasta e bastante fértil. Vários trabalhos, como prosseguimento deste, poderiam ser sugeridos.

A não ser em *ADC* utilizamos *VLB* em todas as outras propostas. Um trabalho futuro seria a utilização da *VLB* em *ADC* considerando-se os assinantes das bordas. Estes assinantes seriam atendidos pelas células que estivessem com o menor número de canais impedidos.

A distância mínima de reuso utilizada sempre foi constante e na condição de pior caso nas propostas apresentadas para as técnicas globais de alocação. Um trabalho futuro seria a utilização de distâncias mínimas de reuso variáveis (dinâmicas) entre as células com as técnicas propostas.

Outros trabalhos incluiriam o estudo do efeito de handoff no desempenho dos algoritmos, o efeito dos algoritmos na interferência cocanal, e outras.

Sem dúvida alguma, o trabalho mais desafiador seria a implementação prática de algum destes algoritmos.

Apêndice A

Prabhu e Rappaport

Este apêndice tem por objetivo descrever o estudo de dois métodos aproximados para análise de um sistema celular com alocação dinâmica proposto por *Prabhu e Rappaport* [28]. Estes métodos são analisados em termos do tráfego cursado e não em função dos estados do sistema. Os dois métodos apresentam um grau de dificuldade menor do que os métodos disponíveis da época. Estes métodos aplicam-se somente a casos *uni-dimensionais* e com apenas uma frequência.

A.1 Hipóteses

Suponha que a área de serviço seja dividida em células de mesmo tamanho. As chamadas são atendidas por alocação dinâmica do tipo *FA (First Available)*. Chamadas bloqueadas são retiradas do sistema e a distância de reuso de uma célula é suficiente para minimizar a interferência co-canal. Considera-se um modelo uni-dimensional com N células, mas o método pode ser estendido para duas dimensões. As células são suficientemente grandes para que os efeitos das bordas sejam desprezados. Supõe-se que as chamadas sejam independentes, utiliza-se o modelo de *Poisson* com taxa média de chegada das chamadas λ_i ($i = 1, 2, \dots, N$) e consideram-se os tempos de retenção como variáveis aleatórias com uma mesma distribuição exponencial negativa de média $1/\mu$.

A.2 Método Clássico Baseado nas Equações de Estado

O método clássico para encontrar a probabilidade de bloqueio nas células é descrito a seguir. Todos os possíveis estados que satisfaçam um determinado conjunto de condições são listados. Por exemplo, os estados podem ser listados como $E_{i,j,k,\dots}^m$ onde o índice superior m indica o número de chamadas simultâneas ocorrendo no sistema, e o índice inferior identifica as células onde as chamadas estão ocorrendo. Se $P_{i,j,k,\dots}^m$ é a probabilidade do estado $E_{i,j,k,\dots}^m$, então pode-se mostrar que

$$P_{i,j,k,\dots}^m = \left(\prod_{x=i,j,k,\dots} \rho_x \right) P^0 \quad (\text{A.1})$$

onde P^0 é a probabilidade do estado E^0 (sistema sem chamadas) e ρ_i é a intensidade de tráfego da célula i ($\rho_i = \lambda_i/\mu$). Note que a soma das probabilidades de todos os possíveis estados é igual a um. Portando

$$\sum_{m=0}^{M(max)} P_{i,j,k,\dots}^m = 1 \quad (\text{A.2})$$

onde $M(max)$ é o número máximo de chamadas simultâneas possíveis. Da Equação (A.1) e (A.2) pode-se determinar P^0 e as outras probabilidades. Para calcular o tráfego atendido por uma certa célula i , lista-se todos os estados em que a célula i esteja envolvida. A soma das probabilidades destes estados determina a probabilidade do atendimento de chamadas na célula i . Suponha que este valor seja a_i . Então a probabilidade de bloqueio, Pb_i , é, por definição,

$$Pb_i = 1 - (a_i/\rho_i). \quad (\text{A.3})$$

Neste método, a listagem dos estados para um sistema de grande porte torna-se muito difícil. O número de estados aumenta, aproximadamente, como uma função fatorial da quantidade de células. Muitos destes estados podem ser considerados como casos particulares quando a intensidade de tráfego é a mesma em todas as células.

A.3 Método 1

No caso de um único canal, o método aproximado utiliza o fato de que o tráfego cursado (atendido) pelo canal é exatamente igual à fração do tempo que o canal está ocupado [41]. Considere o sistema uni-dimensional com N células e com apenas um canal, mostrado esquematicamente na Figura A.1.

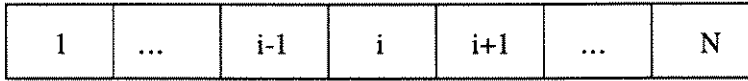


Figura A.1: Sistema uni-dimensional.

Como as chamadas em cada célula é um processo de Poisson, a probabilidade de bloqueio de uma chamada na célula i é igual à probabilidade do canal estar sendo utilizado em i ou estar sendo utilizado pelas suas células interferentes. Seja A_i o evento das chamadas cursadas na célula i , e a_i a probabilidade associada com o evento A_i . Note que a_i é o mesmo daquele definido na Equação (A.3).

Considerando a célula i , uma nova chamada em i será bloqueada se o canal estiver em uso nas células $i-1$, i , $i+1$, correspondendo à união dos eventos A_{i-1} , A_i e A_{i+1} . A probabilidade de bloqueio na célula i , Pb_i , é

$$Pb_i = p(A_{i-1} \cup A_i \cup A_{i+1}), \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{A.4})$$

onde A_0 e A_{N+1} são eventos nulos. Expandindo o lado direito da Equação A.4 obtém-se

$$\begin{aligned} Pb_i = & p(A_{i-1}) + p(A_i) + p(A_{i+1}) - p(A_{i-1} \cap A_i) \\ & - p(A_{i-1} \cap A_{i+1}) - p(A_i \cap A_{i+1}), \\ & i = 1, \dots, N \quad \text{com } p(A_0) = p(A_{N+1}) = 0. \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

O canal não pode ser usado simultaneamente em células adjacentes devido à interferência co-canal, portanto

$$p(A_i \cap A_j) = 0, \quad |i - j| = 1 \quad (\text{A.6})$$

e a Equação (A.5) pode ser escrita como

$$\begin{aligned} Pb_i &= p(A_{i-1}) + p(A_i) + p(A_{i+1}) - p(A_{i-1} \cap A_{i+1}), \\ i &= 1, \dots, N \quad \text{com } p(A_0) = p(A_{N+1}) = 0. \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Uma solução aproximada para o sistema de equações (A.7) pode ser obtida considerando que os eventos A_{i-1} e A_{i+1} sejam estatisticamente independentes. Esta suposição é válida para tráfegos de baixa intensidade. Então,

$$Pb_i \simeq a_{i-1} + a_i + a_{i+1} - a_{i-1}a_{i+1}. \quad (\text{A.8})$$

Eliminando Pb_i da Equação (A.8) usando (A.3) obtém-se o sistema de equações

$$\begin{aligned} a_{i-1} + a_i(1 + 1/\rho_i) + a_{i+1} - a_{i-1}a_{i+1} &= 1, \\ i &= 1, \dots, N \quad \text{com } a_0 = a_{N+1} = 0. \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Observe que a_i é determinado pela solução das N equações não lineares. A probabilidade de bloqueio Pb_i de cada célula é calculado pela Equação (A.3). O método de Newton [42] foi utilizado pelos autores [28] na resolução destas equações não lineares. Os autores começaram com valores aproximados de a_i e através das correções e_i chegaram ao nível de exatidão desejado. Assim, o problema reduz-se à resolução de um sistema de N equações lineares em e_i . Seja $a_i^{n+1} = a_i^n + e_i^n$. O sistema de equações (A.9) pode ser resolvido pela fórmula recursiva

$$\begin{bmatrix}
 (1 + 1/\rho_1) & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\
 (1 - a_3) & (1 + 1/\rho_2) & (1 - a_1) & \cdots & \cdots & 0 \\
 & & & \vdots & & \\
 0 & & \cdots & (1 - a_{i+1}) & (1 + 1/\rho_i) & (1 - a_{i-1}) & \cdots & 0 \\
 & & & & \vdots & & & \\
 0 & \cdots & & & & \cdots & 1 & (1 + 1/\rho_N)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 e_1 \\
 e_2 \\
 \vdots \\
 e_i \\
 \vdots \\
 e_N
 \end{bmatrix}_n
 =
 \begin{bmatrix}
 1 - a_1(1 + 1/\rho_1) + a_2 \\
 1 - \{a_1 + a_2(1 + 1/\rho_2) + a_3 - a_1a_3\} \\
 \vdots \\
 1 - \{a_{i-1} + a_i(1 + 1/\rho_i) + a_{i+1} - a_{i-1}a_{i+1}\} \\
 \vdots \\
 1 - \{a_{N-1} + a_N(1 + 1/\rho_N)\}
 \end{bmatrix}_N
 \quad (A.10)$$

e

$$a_i^{(n+1)} = a_i^{(n)} + e_i^{(n)}, \quad i=1, \dots, N. \quad (A.11)$$

A.4 Método 2

No método analisado anteriormente a complexidade aumenta linearmente com o número de células no sistema. Às vezes estamos interessado somente em conhecer a probabilidade de bloqueio de algumas células, especialmente aquelas que tenham um alto nível de tráfego. Assim não haveria necessidade da resolução completa do sistema para obter as probabilidades de bloqueio de um número reduzido de células. Portanto seria interessante conhecer como o tamanho do sistema e sua carga (distribuição de tráfego) afeta o tráfego cursado de uma determinada célula.

Como exemplo, considere o problema de se obter o grau de serviço de uma determinada célula conhecendo-se os níveis de tráfego do sistema. A aproximação é feita considerando-se somente as células que estão distantes no máximo de três ou quatro da área de serviço

de interesse para a solução do subsistema. Suponha que estamos interessados no grau de serviço da célula i . Considere o subsistema com distância M em relação a célula i , conforme a Figura A.2.

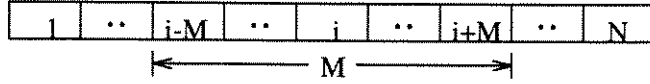


Figura A.2: Sistema de grande porte unidimensional mostrando a região de interesse.

Mesmo quando a célula de interesse está próxima da borda do sistema, consideramos a distância M nas duas direções da célula, porém para um determinado valor de M aumentamos o número das células somente em uma direção. Para um sistema com distância mínima de reuso de uma célula, as equações de interesse são

$$\begin{aligned}
 i - M &\rightarrow a_{i-M-1} + a_{i-M}(1 + 1/\rho_{i-M}) + a_{i-M+1} - a_{i-M-1}a_{i-M+1} = 1 \\
 i &\rightarrow a_{i-1} + a_i(1 + 1/\rho_i) + a_{i+1} - a_{i-1}a_{i+1} = 1 \\
 i + M &\rightarrow a_{i+M-1} + a_{i+M}(1 + 1/\rho_{i+M}) + a_{i+M+1} - a_{i+M-1}a_{i+M+1} = 1.
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

Observe que temos $(2M + 1)$ equações para $(2M + 3)$ variáveis em (A.12). As duas equações que completam o subsistema estão associadas às duas células fora da distância M , isto é, as células $(i - M - 1)$ e $(i + M + 1)$. Se considerarmos que a_{i-M-1} e a_{i+M+1} são nulos, estamos desprezando os efeitos das células restantes do sistema. Por outro lado, podemos supor um grau de serviço semelhante entre as células localizadas na borda do subsistema. Esta última hipótese pode ser uma aproximação melhor do que a primeira. Assim temos

$$\begin{aligned}
 a_{i-M-1} &= a_{i-M}(\rho_{i-M-1}/\rho_{i-M}) \\
 a_{i+M+1} &= a_{i+M}(\rho_{i+M+1}/\rho_{i+M}).
 \end{aligned} \tag{A.13}$$

Substituindo estes valores em (A.12) obtemos

$$\begin{aligned}
 \{1 + (\frac{1+\rho_{i-M-1}}{\rho_{i-M}})\}a_{i-M} + a_{i-M+1} - a_{i-M}a_{i-M+1}(\frac{\rho_{i-M-1}}{\rho_{i-M}}) &= 1 \\
 a_{i-1} + a_i(1 + 1/\rho_i) + a_{i+1} - a_{i-1}a_{i+1} &= 1 \\
 a_{i+M-1} + a_{i+M}\{1 + (\frac{1+\rho_{i+M+1}}{\rho_{i+M}})\} - a_{i+M-1}a_{i+M}(\frac{\rho_{i+M+1}}{\rho_{i+M}}) &= 1
 \end{aligned} \tag{A.14}$$

A resolução das equações (A.14) pode ser feita pelos valores de a_j ($j = i - M, \dots, i + M$) usando o método de *Newton*, como no *método 1*.

Mencionamos anteriormente que é possível desprezar os efeitos *residuais* do sistema no subsistema. Neste caso, podemos utilizar as equações não lineares (A.12) com a_{i-M-1} e a_{i+M+1} iguais a zero ou as equações de estado do subsistema. Assim a complexidade do problema é significativamente reduzida em virtude da lista de estados em um subsistema ser bem mais simples do que num sistema completo.

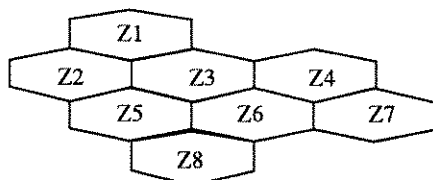
Apêndice B

Sengoku, Itoh e Matsumoto

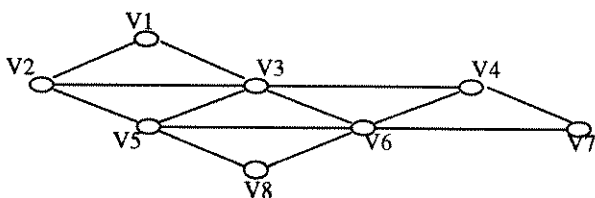
Este apêndice tem como objetivo descrever o estudo da capacidade de tráfego através da teoria de grafos desenvolvida por *Sengoku, Itoh e Matsumoto* [29].

Seja um grafo não orientado que representa a relação entre uma célula e suas interferentes. Este grafo é conveniente na caracterização do tráfego do sistema.

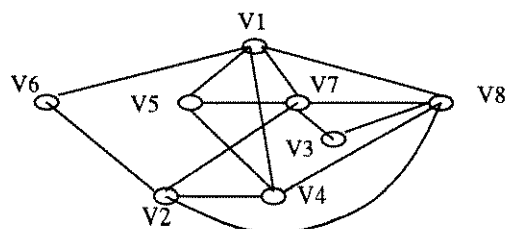
Seja o grafo $G^* = (V^*, E^*)$ onde V^* e E^* são o conjunto de vértices e ramos. O vértice $v_i (\in V^*)$ corresponde à célula $z_i (i = 1, 2, \dots, n)$ e um ramo $e_k = (v_i, v_j)$ indica que a célula z_i é interferente de z_j .



(a) Sistema.



(b) grafo G^* .



(c) grafo $\overline{G^*}$.

Figura B.1: Sistema e seu grafo.

Como exemplo, considere o sistema da Figura B.1(a). Se as células interferentes são constituídas de células contíguas, o grafo G^* é o da Figura B.1(b). A Figura B.1(c) é o complemento de G^* .

Suponha que o tráfego seja uniformemente distribuído sobre a área de serviço, tal que a média da taxa de chegada seja idêntica em todas as células e que o usuário não faça handoff durante a chamada. Seja a o tráfego total e considere o caso de um canal. Suponha as seguintes hipóteses

- i. a chegada de chamadas ocorre de acordo com um processo de *Poisson* de intensidade λ ;
- ii. a duração da chamada (tempo de retenção) é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa de média $1/\mu$.

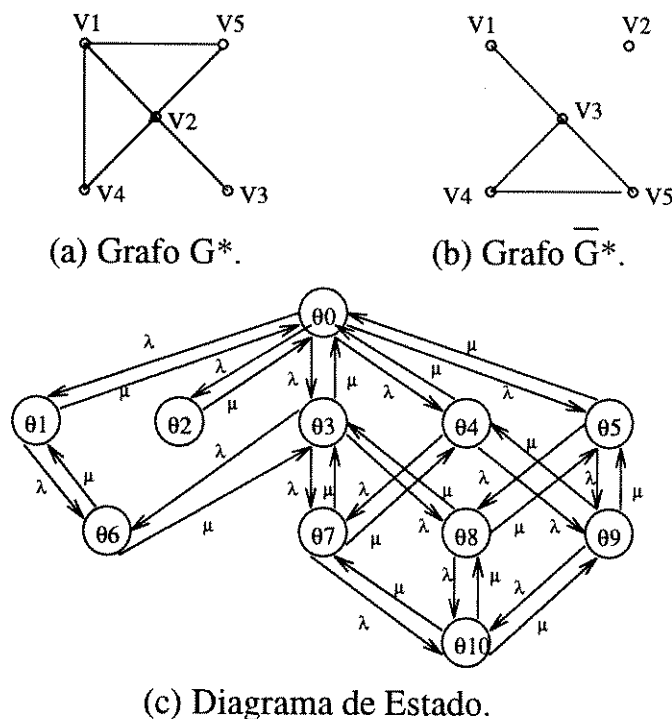


Figura B.2: Exemplo de um diagrama de estado.

Existem muitas maneiras do canal estar sendo utilizado simultaneamente nas células. Cada uma destas maneiras corresponde a um estado do sistema. Seja Θ o conjunto de

estados. Um elemento do conjunto (θ_i) consiste de vértices (do grafo G^* ou $\overline{G^*}$) das células que estão usando o canal. $S^+(\theta_i) = \{\theta_{i_1}^+, \theta_{i_2}^+, \dots, \theta_{i_{\alpha(\theta_i)}}^+\}$ é o conjunto cujos elementos $\theta_{i_j}^+$ compõem o estado após a ocorrência de uma chamada em θ_i . Analogamente, $S^-(\theta_i) = \{\theta_{i_1}^-, \theta_{i_2}^-, \dots, \theta_{i_{\beta(\theta_i)}}^-\}$ é o conjunto cujos elementos $\theta_{i_j}^-$ compõem o estado após o término de uma chamada em θ_i . Das hipóteses consideradas, a probabilidade de ocorrência ou término de uma chamada num intervalo curto de tempo Δt no estado θ_i é respectivamente, $\alpha(\theta_i)\lambda\Delta t$ ou $\beta(\theta_i)\mu\Delta t$. A probabilidade de transição do estado $\theta_j \in S^+(\theta_i)$ ou $\theta_j \in S^-(\theta_i)$ para um estado θ_i é respectivamente, $\mu\Delta t$ ou $\lambda\Delta t$. Como exemplo, considere a Figura B.2.

No sistema representado pelos grafos G^* e $\overline{G^*}$ na Figura B.2(a) e B.2(b),

$$\begin{aligned}\Theta &= \{\phi, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_1v_3, v_3v_4, v_3v_5, v_3v_4v_5\} \\ &= \{\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}\}.\end{aligned}$$

O diagrama de estados deste sistema é mostrado na Figura B.2(c). Nesta figura, Δt é omitido e a seta indica a probabilidade de transição entre os estados.

Seja $P(\theta_i)$ a probabilidade de estar no estado θ_i . Suponha que o sistema esteja em regime (estatisticamente equilibrado), então

$$\begin{aligned}P(\theta_i)\alpha(\theta_i)\lambda\Delta t + P(\theta_i)\beta(\theta_i)\mu\Delta t \\ = \sum_{\theta_j \in S^+(\theta_i)} P(\theta_j)\mu\Delta t + \sum_{\theta_j \in S^-(\theta_i)} P(\theta_j)\lambda\Delta t\end{aligned}\tag{B.1}$$

onde os termos de ordem superior são desprezados quando $\Delta t \rightarrow 0$. Seja n o número de células do sistema. Como $\lambda/\mu = a/n$,

$$\begin{aligned}P(\theta_i)\{\alpha(\theta_i)a/n + \beta(\theta_i)\} \\ = \sum_{\theta_j \in S^+(\theta_i)} P(\theta_j) + (a/n)\sum_{\theta_j \in S^-(\theta_i)} P(\theta_j).\end{aligned}\tag{B.2}$$

Então a equação

$$P(\theta_i) = (a/n)^k P(\theta_0)\tag{B.3}$$

é a solução da equação (B.2), onde $\theta_i = v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_k}$ e $\theta_0 = \{\phi\}$, isto é, θ_0 é o estado no qual o canal não é empregado por qualquer das células do sistema.

Seja

$$\begin{aligned}\Theta &= \{\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{k_m}\}, \\ \Theta_k &= \{\theta_i \mid \theta_i \in \Theta, |\theta_i| = k\}\end{aligned}\tag{B.4}$$

onde $|\theta_i|$ indica o número cardinal de θ_i . Seja P_x a probabilidade que o canal esteja em uso simultaneamente em x células. Então,

$$P_x = \sum_{\theta_i \in \Theta_x} P(\theta_i) = (a/n)^x \nu_x P(\theta_0),$$

onde

$$\nu_x = |\Theta_x|.\tag{B.5}$$

Usando

$$\begin{aligned}\sum_{x=0}^{\infty} P_x &= 1, \\ P(\theta_0) &= \frac{1}{\sum_{i=0}^{k_m} (a/n)^i \nu_i}.\end{aligned}$$

Portanto

$$P_x = \frac{(a/n)^x \nu_x}{\sum_{i=0}^{k_m} (a/n)^i \nu_i}\tag{B.6}$$

onde $x = 0, 1, 2, \dots, k_m$. O tráfego total cursado é

$$\begin{aligned}a_c &= \sum_{i=1}^{k_m} i P_i \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{k_m} i (a/n)^i \nu_i}{\sum_{i=0}^{k_m} (a/n)^i \nu_i}.\end{aligned}\tag{B.7}$$

A probabilidade de bloqueio no sistema é

$$B = 1 - a_c/a.\tag{B.8}$$

Apêndice C

Raymond

Este apêndice tem como objetivo descrever o estudo de um sistema celular simples. Algumas técnicas de alocação dinâmica de canais são analisadas. Foi calculado o desempenho ótimo de um sistema simples com alocação dinâmica e os limites superiores do desempenho ótimo determinados em [30].

Considere um conjunto $C = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_K)$ de células e $\mathcal{F} = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N)$ de canais. O tráfego oferecido por célula é um processo de *Poisson*, com o mesmo parâmetro λ para todas as células. A duração das chamadas é uma distribuição exponencial negativa de parâmetro μ .

A *atividade* do sistema é descrita por um vetor $\vec{s} = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_K)$ onde s_i é o número de chamadas atendidas pela célula c_i . Um determinado vetor $\vec{s}$ é denominado *admissível* se e somente se é possível alocar s_i canais em c_i , desde que $i \leq K$ e respeitando-se a distância mínima de reuso. $\mathcal{S}$ denota o conjunto admissível de s_i . O processo aleatório de dimensão K , que descreve a evolução no tempo da atividade, será denotada por $\vec{x}(t)$. O intervalo de $\vec{x}(t)$ é $\mathcal{S}$. A i -ésima coordenada $x_i(t)$ é o número de chamadas em progresso em c_i no tempo t . Denotaremos $\mathcal{P}(\cdot)$ para uma distribuição estacionária de $\{x(t)\}$ e $\vec{x} = (x_1, \dots, x_K)$ para um vetor aleatório cuja distribuição seja $\mathcal{P}(\cdot)$. Além disso, considere $\vec{e}_i$ como a coordenada unitária do vetor de comprimento K contendo 1 na i -ésima posição e zeros nas posições restantes.

C.1 Alocação de Canal

O conjunto de vetores atividade depende da estratégia da alocação de canal. Por exemplo, *FA* (*First Available*) atinge os estados $\mathbf{s}$ quando $s_i \leq k_i, i = 1, \dots, K$ onde k_i é o número de canais assinalados para c_i . Seja $\mathcal{S}_a$ os vetores atividade da estratégia a . Por causa da limitação do reuso, $\mathcal{S}_a \subset \mathcal{S}$. O vetor atividade não é uma variável de estado típico e $\vec{x}(\cdot)$ não é uma variável de Markov. As considerações estatísticas (processo de Poisson na chegada, tempo de retenção exponencial) asseguram que a lista de canais em uso a cada instante e em cada célula forma um processo de Markov, porém o diagrama de estado é grande e complexo. Entretanto, existe um subconjunto de estratégias de alocação de canais para os quais $\vec{x}(\cdot)$ é um processo de Markov. A estratégia considerada pelo autor é deste tipo. Suponha que as admissões sejam *liberais*, isto é, se a atividade do sistema é $\vec{s}$ uma nova chamada em c_i será aceita se e somente se $\vec{s} + \vec{e}_i$ (o estado em que o sistema se move após a entrada da chamada) é um elemento de $\mathcal{S}_a$. Estes dois atributos - $\vec{x}(\cdot)$ Markoviano, admissões liberais - juntos implicam que $\vec{x}(\cdot)$ é reversível no equilíbrio em regime, assim a distribuição estacionária (equilíbrio) $\mathcal{P}(\vec{s}) = \mathcal{P}(0) \prod_{i=1}^K \frac{\rho^{s_i}}{s_i!}$, onde $\rho = \lambda/\mu$ e a constante $\mathcal{P}(0)$ é determinada pela condição da soma de $\mathcal{P}(\vec{s})$ ser unitária sobre $\mathcal{S}_a$.

Diferentes estratégias, na classe em questão, são distinguidas apenas pela identidade de $\mathcal{S}_a$ e a constante $\mathcal{P}(0)$.

C.2 Máximo Empacotamento

C.2.1 Descrição

Para o máximo empacotamento (*ME*), o conjunto $\mathcal{S}_{me} = \mathcal{S}$ é usado. Há várias razões em considerar *ME*.

1. A distribuição estacionária dos estados é simples de calcular.
2. Fornece um ótimo desempenho para tráfego de baixa intensidade.
3. Apresenta um excelente desempenho com um controle de fluxo otimizado.

C.2.2 Alocação para Sistema Linear

Um sistema celular linear pode ser usado, por exemplo, para modelar a cobertura de uma rodovia.

Definição 1: o grafo adjacente de um sistema celular possui um nó para cada célula e um ramo entre dois nós se e somente se as células correspondentes não utilizam o mesmo canal simultaneamente.

Definição 2: uma rede linear é uma rede celular cujo grafo adjacente possui grau ¹ 2 e nenhum ciclo.

Em uma rede linear, somente células fisicamente adjacentes interfere; o reuso é de duas células.

Proposição: em uma rede linear é possível implementar o empacotamento máximo sem precisar utilizar mais do que dois rearranjos na chegada de uma nova chamada, independentemente do tamanho da rede.

Prova: seja os canais $i, \dots, N$. Considere o seguinte algoritmo de alocação, baseado em [22]. Uma nova chamada na célula c_i é bloqueada se a população de vetores $\vec{s}$ no instante de chegada satisfaz

$$s_i + s_{i-1} = N \quad \text{ou} \quad s_i + s_{i+1} = N \quad (\text{C.1})$$

caso contrário, se i for par o canal livre de *menor* ordem é alocado para a nova chamada. Analogamente, se i for ímpar o canal livre de *maior* ordem é alocado para atender a chamada. Rearranjos podem acontecer somente na chegada de novas chamadas, e quando necessários. Seja i par ² e a condição da equação (C.1) não ocorra em c_i . Para cada célula c_j , defina dois ponteiros: $U(j)$, ponteiro do canal de maior ordem em uso na célula c_j , e $L(j)$, ponteiro

¹O grau (valência) de um grafo é o número máximo de ramos em um vértice

²A prova no caso complementar, i ímpar, é similar.

do canal de menor ordem. Suponha que

$$U(2j) < L(2j \pm 1) \quad \forall j \quad (\text{C.2})$$

é a condição no instante da chegada de uma nova chamada. Se n indica o canal livre de menor ordem em c_i e $n < L(i \pm 1)$ (i par), então a alocação prossegue sem rearranjo, $U(i)$ é atualizado e a condição (C.2) continua válida; caso contrário, $n = U(i) + 1 = L(k)$ onde $k = i + 1$ ou $k = i - 1$. Como a condição (C.1) não ocorre, então deve existir um canal livre de ordem m na célula c_k tal que $m > L(k)$. A chamada atendida pelo canal de ordem $L(k)$ na célula c_k é rearranjada para o canal de ordem m , e a nova chamada da célula c_i é assinalada para o canal de ordem n , $U(i)$ é incrementado por uma unidade e $L(k)$ é decrementado por uma unidade, e os ponteiros restantes continuam inalterados. A conclusão é que se a condição (C.2) é mantido no início, ela permanece sempre.

Esta proposição não pode ser extendido para outras limitações de reuso ou rede bidimensionais.

C.3 Clique Packing

Um conjunto de células em que todas interferem uma com outras é denominada *clique*. Seja C o conjunto de todas as *cliques* em $\mathcal{C}$. Seja $\mathcal{S}_{cp} \triangleq \{\vec{s} : \forall c_i \in C, \sum_{c_i \in C} s_i \leq N\}$. Note que $\mathcal{S} \subset \mathcal{S}_{cp}$, mas em geral $\mathcal{S} \neq \mathcal{S}_{cp}$. A estratégia *clique packing (CP)* aceita uma nova chamada na célula c_j se e somente se o estado $\vec{s} \in \mathcal{S}_{cp}$ no instante da chegada é tal que $\vec{s} + \vec{e}_j \in \mathcal{S}_{cp}$.

Desde que isto viola a limitação do reuso, *CP* não possui aplicação prática. Entretanto, se a probabilidade de estados em $\mathcal{S}_{cp} - \mathcal{S}$ é suficientemente pequeno, o algoritmo pode servir como uma aproximação para *ME*.

C.4 Alocação de Markov

Neste algoritmo aloca-se uma lista ordenada de N canais para cada célula. Uma nova chamada é atendida pelo primeiro canal livre da lista, desde que esteja livre nas células adjacentes. Caso contrário, a chamada é bloqueada - mesmo que haja canais disponíveis na lista ordenada. Quando uma chamada termina, há um rearranjo para ordenar os canais em uso, isto é, os canais estão sempre de acordo com a lista. O problema da alocação de Markov (AM) é ordenar a lista para as diferentes células.

Este procedimento garante que a alocação de canais na rede seja determinada unicamente pela população de vetores. $\mathcal{S}_{am}$ indica o conjunto de estados admissíveis para AM.

Escolher seqüências para cada célula na AM é similar a alocar canais nominais em FA. Considere uma rede com um reuso de três células e seis canais. Necessita-se somente de três seqüências e seja $VERMELHO = \{1, 4, 5, 6, 2, 3\}$, $AZUL = \{2, 5, 6, 4, 3, 1\}$, $VERDE = \{3, 6, 4, 5, 1, 2\}$ essas seqüências. Este exemplo é similar a estratégia de empréstimo de canal [22]: células vermelhas solicitam empréstimo preferencialmente das células azuis, as azuis das verdes e as verdes das vermelhas.

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] Lindell, F., Skold, J., Willars, P and Nilsson, E. , “Radio Access Technology Evolution”, *Telecommunications*, March 1994, pp. 29-36.
- [5] Holbeche, R. J., *Land Mobile Radio Systems*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1985.
- [6] 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.
- [7] —, *Novatel Cellular System — Functional Description and Theory of Operation*, Novatel Communications Ltd., Calgary, 1988.
- [8] Shinoda, A. A. , *Simulação de Sistemas de Comunicações Móveis de Grande Porte com a Variação do Limiar de Bloqueio*, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Abril de 1993.

- [9] Eklundth, B, "Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry", 11th International Teletraffic Congress, 1985.
- [10] Furuya, Y. and Akaiwa, Y. , "Channel Segregation, a Distributed Channel Allocation Scheme for Mobile Communication Systems", IEICE Transactions, Vol. E 74, No. 6, June 1991, pp. 1531-1537.
- [11] Grevel, M. and Sachs, A. , "A Graph Theoretical Analysis of Communications Systems", Siemens Forsch.-U. Entwickl.-Ber. Bd, 12 (1983) No. 5, pp. 298-305.
- [12] Bron, C. and Kerbosch, J. , "Finding All Cliques of an Undirected Graph", Communications of the ACM, Vol. 16, No. 9, September 1973, pp. 575-577.
- [13] Zoellner, J. and Beal, C. , "A Breakthrough in Spectrum Conserving Frequency Assignment Technology", IEEE Transactions on Electrical Computer, Vol. EM-19, August 1977, pp. 313-319.
- [14] Box, F. , "A Heuristical Technique for Assigning Frequencies to Mobile Radio Nets", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-27, No. 2, May 1978, pp. 57-74.
- [15] Hale, W. , "Frequency Assignment: Theory and Applications", Proceedings of IEEE, Vol. VT-29, No. 2, May 1980, pp. 527-278.
- [16] Dikoku, K and Ohdate, H. , "Optimal Design for Cellular Mobile Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-34, No.1, February 1985, pp 3-12.
- [17] Gardiner, J. and Kotsopoulos, S., "Relationship between Base Station Transmitter Multicompling Requirements and Frequency Planning Strategies for Cellular Mobile Radio", IEEE Proceedings, Vol. 132, August 1985, pp. 384-387.
- [18] Meyerhoff, H., "Network Planning and Spectrum Efficiency", Cellular and Mobile Communication, Onring Publ., Pinner, Vol. 12, 1985, pp. 125-137.

- [19] Chan, G. and Mahmoud, S. , "A Spectrum Efficient Interference Free Frequency Allocation Scheme for a Cellular Radio Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-35, No. 1, February 1986, pp. 15-21.
- [20] Engel, J. S. and Peritsky, M. M., "Statistically Optimum Dynamic Server Assignment in System with Interfering Serves", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-21 No. 11, November 1973, pp. 1287-1293.
- [21] Anderson, L. G. , "A Simulation Study of Some Dynamic Channel Assignment Algorithm in a High Capacity Mobile Telecommunication Systems", IEEE Transactions on Communications, November 1973, pp. 1294-1301.
- [22] Elnoubi, S. M. Singh, R. and Gupta, S. C., "A New Frequency Channel Assignment Algorithm in a High Capacity Mobile Communication Systems", IEEE Transactions on Communications, August 1982, pp. 125-131.
- [23] Zhang, M. and Yum, T. S., "Comparisons of Channel Assignment Strategies in Cellular Mobile Telephone Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 38, No. 4, November 1989, pp. 211-215.
- [24] Xu, Z. and Mirchandani, P. B. , "Virtually Fixed Channel Assignment for Cellular Radio Telephone Systems: A Model and Evaluation", IEEE, 92CH3132-8/0000-1037, ICC'92, 1992, pp. 336.3.1-336.3.5.
- [25] Jiang, H. and Rappaport, S. S. , "CBWL: A New Channel Assignment and Sharing Method for Cellular Communication Systems", IEEE Vehicular Technology Conference 43th, 0-7803-1266-x/93, 1993, pp. 189-193.
- [26] Cox, D. C. and Reudink, D. O. , "A Comparison of Some Channel Assignment Strategies in Large-Scale Mobile Communications Systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-20, No. 2, April 1972, pp. 190-195.
- [27] Cox, D. C. and Reudink, D. O. , "Increasing Channel Occupancy in Large-Scale

- Mobile Radio Systems: Dynamic Channel Reassignment", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-21, No. 11, November 1973, pp. 1302-1306.
- [28] Prabhu, V. and Rappaport, S. S. , "Aproximate Analysis for Dynamic Channel Assignment in Large Systems with Cellular Structure", IEEE Transactions on Communications, October 1974, pp. 1715-1720.
- [29] Sengoku, M., Itoh, K. and Matsumoto, T. , "A Dynamic Frequency Assignment Algorithm in Mobile Radio Communication Systems", The Transactions of the IECE of Japan, Vol. E 61, No. 7, July 1978, pp. 527-533.
- [30] Raymond, P. A. , "Performance Analysis of Cellular Networks", IEEE Transactions on Communications, Vol. 39, No. 12, December 1991, pp. 1787-1793.
- [31] Nakano, K., Yokono, M., Sengoku, M., Yamaguchi, Y., Shinoda, S., Motoka, S. and Abe, T. , "An Application of Dynamic Channel Assignment to a Part of a Service Area of a Cellular Mobile Communication System", IEICE Transactions Fundamentals, Vol. E75-A, No. 3, March 1992, pp. 369-379.
- [32] Nakano, K., Sengoku, M., Takahashi, T., Yamaguchi, Y., Shinoda, S. and Abe, T. , "Rearrangement Methods of Dynamic Channel Assignment in Cellular Mobile Systems", IEICE Transactions Fundamentals, Vol. E75-A, No. 12, December 1992, pp. 1660-1666.
- [33] Sengoku, M., Kurata, M. and Tajima, Y. , "Rearrangement of switching networks and its application to a mobile radio communication system", Proc. IEEE International Conference on Circuits and Computers, October 1980, pp.402-405.
- [34] Okada, K. and Kubota, F. , "A Proposal of a Dynamic Channel Assignment Strategy with Information of Moving Direction in Micro Cellular Systems", IEICE Transactions Fundamentals, Vol. E75-A, No. 12, December 1992, pp. 1667-1673.
- [35] Kawa, T. J. and Georganas, N. D. , "A Hibrid Channel Assignment Scheme in Large-Scale, Cellular -Structured Mobile Communication Systems", IEEE Transactions on

Communications, Vol. Com-26, No. 4, April 1978, pp. 432-438.

- [36] Yue, W. , “Analytical Methods to Calculate the Performance of a Cellular Mobile Radio Communication System with Hybrid Channel Assignment”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, No 2, May 1991, pp. 453-460.
- [37] Yacoub, M. D. , *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Florida, USA, 1993.
- [38] Yacoub, M. D., *Mobile Radio with Fuzzy Cell Boundaries*, PhD Thesis, University of Essex, England, May, 1988.
- [39] 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.
- [40] Yacoub, M. D. and Cattermole, K. W. ,”Alternative routing strategies for adjacent cells in mobile radio systems”, IEE Proc.-Commun., Vol. 142, No. 2, April 1995, pp. 115-120.
- [41] Cooper, R. B. , *Introduction to Queuing Theory*, New York, Macmillan, 1972.
- [42] Arden, B. W. and Astill, K. N., *Numerical Algorithms - Origins and Applications*, Reading, Mass, Addison-Wesley, 1970.
- [43] Vargas, J. H. S. , *Traffic Performance of Cellular Mobile Radio Systems*, PhD Thesis, University of Essex, England, June, 1988.
- [44] Sallberg, K. and B. Stavenow, and B. Eklundh, “Hybrid Channel Assignment and Reuse Partitioning in Cellular Mobile Telephone System”, in *Proc. 37th IEEE Vehicular Technology Conf.*, pp. 405-411, 1987.
- [45] Sekiguchi, H., Ishikawa, H., Koyama, M. and Sawada, H. , “Techniques for increasing Frequency Spectrum Utilization in Mobile Radio Communication Systems”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, pp. 26-31.

- [46] Guedes, L. G. R. , *Área de Cobertura e Sobreposição de Células no Ambiente Nakagami*, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Maio de 1995.
- [47] Amorim, R. P. , *Fronteiras entre Células: Ambiente Suzuki, e Rice*, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Maio de 1995.
- [48] Shinoda, A. A. and Yacoub, M. D. , “ Alternative Routing Strategy and Call Reshuffle in Mobile Radio Systems”, 13 Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Setembro 1995.
- [49] Shinoda, A. A. and Yacoub, M. D. , “Alternative Routing Strategy and Call Reshuffle in Mobile Radio Systems”, aceito para publicação Revista da SBT.
- [50] Tajima, J. and Imamura, K., “A Strategy for Flexible Channel Assignment in Mobile Communication Systems”, IEEE Trans. Veh. Technol., VT-37, pp. 92-103, May 1988.
- [51] Kudo, W., Sengoku, M. and Abe, T., “An Adaptive Channel Assignment Algorithm in a Small Cell Mobile Radio Communication System”, IECE Technical Report, CAS 84-61, August 1984.
- [52] Onoe, S. and Yasuda, S., “Flexible Reuse for Dynamic Channel Assignment in Mobile Radio Systems”, Proc. of IEEE Int. Commun. Conf. (ICC), 1, pp. 472-476, June 1989.