

3

Sistemas Celulares Hierarquizados

Como foi comentado no capítulo anterior, a utilização de micro-células visa atender a uma alta demanda de tráfego no sistema celular. Entretanto, quanto menor for a célula, maior será a taxa de *handoff* do sistema. Isto pode ocasionar diversas inconveniências para o funcionamento da rede, tais como: o aumento da carga de sinalização, o aumento da probabilidade de terminação forçada e a redução do intervalo de tempo disponível para a realização do *handoff*, tornando-o crítico.

As macro-células provêem uma cobertura mais ampla e asseguram um melhor *handoff* intercelular, além de apresentar uma baixa taxa de *handoffs* no sistema. Porém, devido a sua distância de reuso ser muito grande, sua capacidade é bem menor do que a do sistema micro-celular.

A procura do equilíbrio entre as vantagens dos sistemas macro-celulares e micro-celulares, onde o principal objetivo é maximizar o número de usuários e minimizar a carga de sinalização devido aos *handoffs* motivou o surgimento dos sistemas celulares hierarquizados.

Uma Estrutura Celular Hierárquica (ECH) consiste de uma ou mais camadas de células. Numa estrutura com duas camadas, o nível mais baixo é ocupado pelas micro-células, enquanto o mais acima é composto por macro-células.

Considerando a natureza heterogênea do tráfego em um ambiente celular, onde os usuários apresentam diferentes graus de mobilidade (pedestres e veículos) é intuitiva a idéia de que classificando os usuários em grupos e designando cada grupo para uma diferente camada do sistema a gerência dos recursos do sistema pode ser otimizada.

Este capítulo aborda a descrição e a análise de estratégias de *handoff*, além de técnicas de partição de espectro para os sistemas multicamadas que utilizam o conceito de estruturas de células hierárquicas.

As micro-células provêem alta capacidade devido ao maior reuso das frequências e servem para cobrir áreas com alto tráfego (*hot spots*) como aeroportos, shoppings e centros de grandes cidades. Áreas com pequeno tráfego como

zonas periféricas, podem ser cobertas sem problemas por uma macro-célula. Geralmente, a infra-estrutura para macro-células é implementada, primeiramente, numa determinada área urbana e quando a demanda de usuários cresce e requer maior capacidade, uma camada de micro-células é, então, implementada em pontos de alto tráfego. Assim, as ECHs requerem a modificação do método de admissão de chamadas.

A fim de avaliar este sistema, três importantes tópicos têm sido estudados para análises de projetos:

- Determinação dos *hot spots*, do tamanho e localização ideal da micro-célula.
- Gerência de recursos entre as camadas: Quantos canais devem ser alocados na micro/macro-célula ? É possível usar as mesmas frequências nas duas camadas ?
- Quando é vantajoso transferir um usuário de uma camada para outra ? Qual política provê melhor QoS ?

Em sistemas GSM, por exemplo, medidas feitas pelos terminais móveis utilizadas para determinar sua localização também são utilizadas para auxiliar na localização dos *hot spots* [8].

Quanto ao gerenciamento de recursos entre as camadas, as principais maneiras de se alocar o espectro entre as diferentes camadas são:

- A banda é dividida entre as camadas e cada uma das camadas utiliza as suas próprias frequências (divisão ortogonal). Neste caso, a divisão pode levar a uma perda de capacidade (*trunking efficiency*);
- Os diferentes tipos de células compartilham o espectro. As potências de transmissão são controladas de tal modo que o sistema possa apresentar uma relação C/I aceitável;
- As diferentes camadas usam a mesma faixa do espectro, mas não ao mesmo tempo. Esta distribuição dinâmica é obtida por meio de uma alocação dinâmica de canais entre as camadas.

Em [9] são testadas algumas distribuições do espectro entre micro-células e macro-células. Considerou-se um compartilhamento ortogonal (TDMA nas duas camadas, em diferentes frequências) e um compartilhamento *spread-spectrum* (TDMA em uma camada e CDMA na outra). Após as comparações concluiu-se que o *spread-spectrum* entre as camadas é possível, mas apresenta

baixa capacidade devido a grande interferência. A melhor estratégia é a de se utilizar diferentes frequências para diferentes camadas. Baseado nisto, este trabalho implementa o compartilhamento ortogonal.

3.1

Gerências de Chamadas em Sistemas Celulares Hierarquizados

As principais referências de sistemas celulares hierarquizados propõem geralmente que os usuários sejam alocados em uma determinada camada de acordo com a sua velocidade visando minimizar o número de *handoffs*. Macro-células devem acomodar terminais com alta mobilidade enquanto micro-células são mais adequadas para terminais com baixa mobilidade.

A fim de aumentar a eficiência do sistema todos os usuários lentos são admitidos, preferencialmente, nas micro-células. As macro-células admitem os usuários rápidos e os usuários lentos que encontrarem as micro-células congestionadas.

Nos chamados sistemas *reversíveis*, o usuário retorna para uma micro-célula assim que houver disponibilidade de recursos na mesma. Já nos sistemas *não-reversíveis*, não há o retorno do usuário para uma micro-célula.

3.1.1

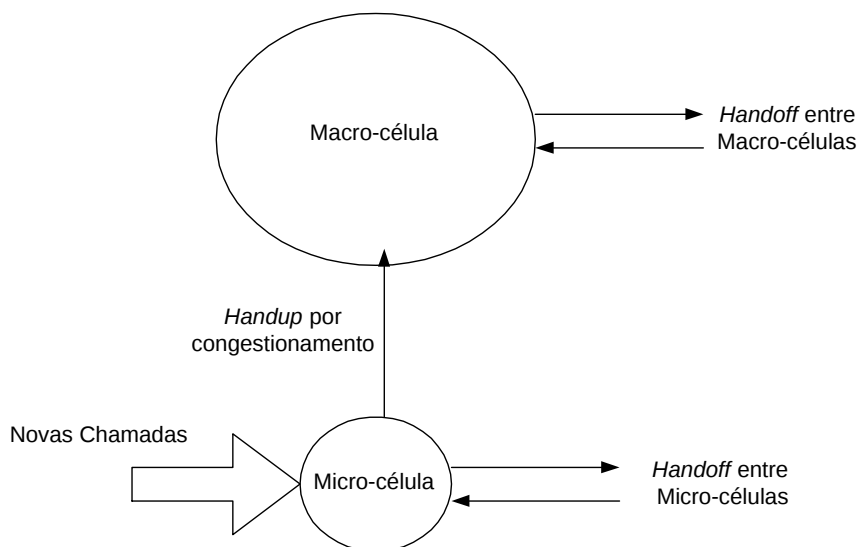
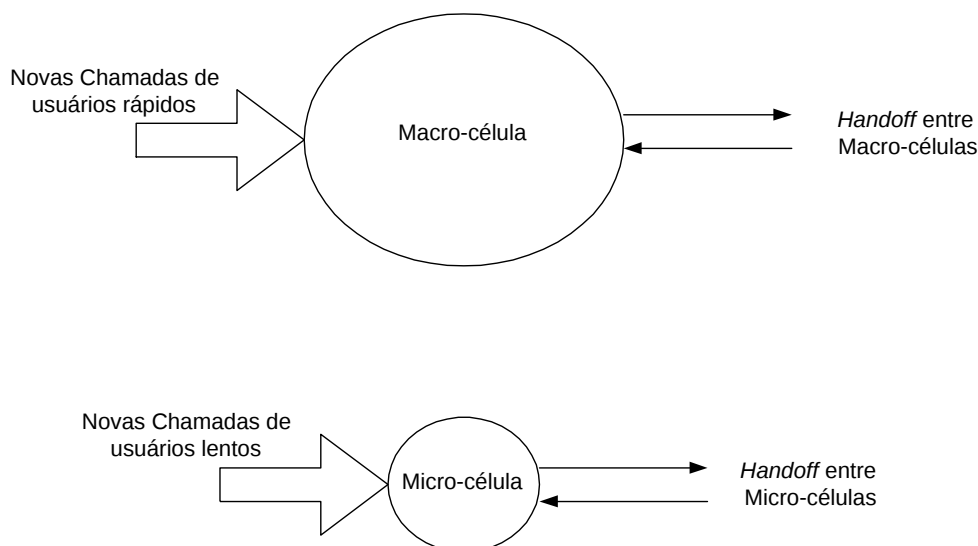
Estratégia do Estouro

Nesta estratégia todas as chamadas são alocadas nas micro-células. Os usuários que encontrarem as micro-células congestionada são alocados nas macro-células. Não há designação de usuários rápidos para as macro-células nem a designação de usuários lentos para as micro-células. A figura 3.1 ilustra esquematicamente a estratégia do estouro.

3.1.2

Estratégia da Velocidade

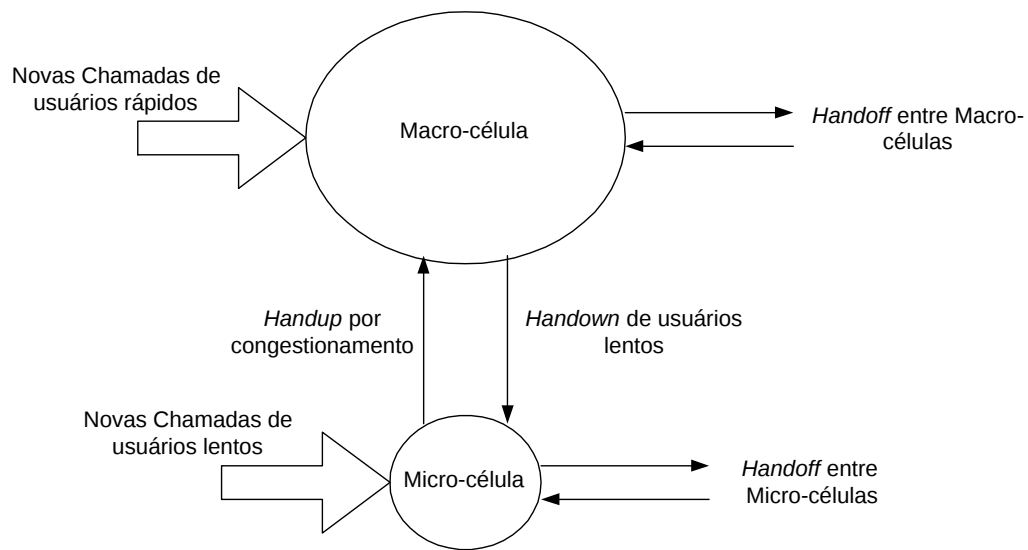
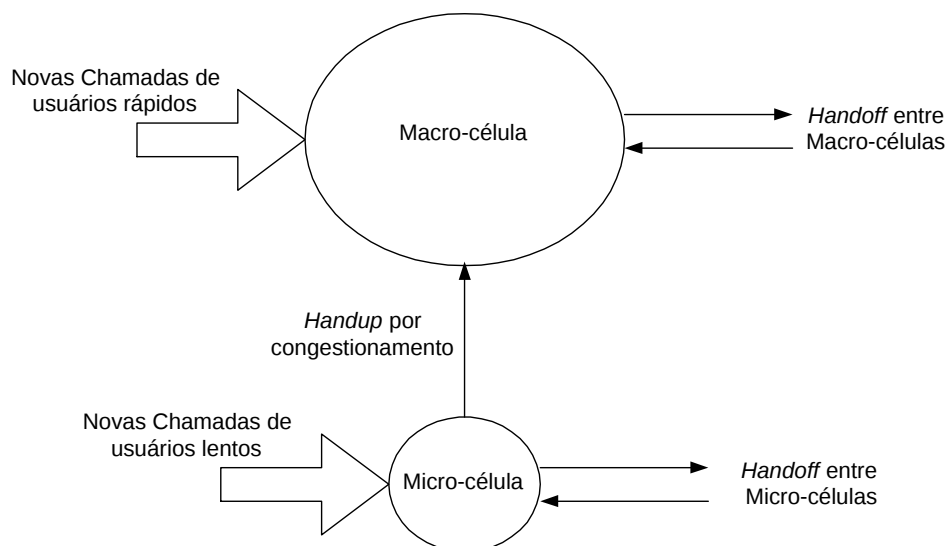
Os usuários são designados para os diferentes níveis de camadas, de acordo com seu grupo de mobilidade. O objetivo desse critério é reduzir a taxa de *handoff*, que está diretamente relacionada à velocidade do usuário. A figura 3.2 ilustra esquematicamente a estratégia da velocidade.

**Figura 3.1** Estratégia do Estouro**Figura 3.2** Estratégia da Velocidade

3.1.3 Estratégia Clássica

O sistema multicamada clássico pode ser visto como uma combinação das estratégias do estouro e da velocidade. Os usuários são designados para as diferentes camadas de acordo com a sua velocidade. Os usuários lentos que encontrarem as micro-células congestionadas são alocados nas macro-células.

A estratégia clássica pode ser reversível ou não-reversível. No caso reversível os usuários lentos são re-designados para as micro-células quando houver liberação de recursos na mesma. Espera-se que a estratégia reversível utilize mais eficientemente os recursos de rádio do que a não-reversível, principalmente quando uma macro-célula sobrepõe muitas micro-células. As figuras 3.3 e 3.4 ilustram esquematicamente a estratégia clássica reversível e não-reversível.

**Figura 3.3** Estratégia Clássica Reversível**Figura 3.4** Estratégia Clássica Não-Reversível

3.2

Métodos para Estimativa de Velocidade do Móvel

Um dos problemas tratados no estudo de sistemas celulares hierarquizados é, justamente, a definição do que são usuários rápidos e usuários lentos. Nesta seção serão apresentados alguns métodos utilizados para determinação destes grupos de mobilidade.

Além de melhorar a cobertura, as ECHs podem oferecer serviços a usuários com diferentes mobilidades ou velocidades, lentos (pedestres por exemplo) ou rápidos (como usuários em veículos). Esta velocidade determina em qual célula será admitido o usuário.

Como não existe uma definição exata relacionada à velocidade, as operadoras determinam um limiar que diferencia os estados lento ou rápido e que depende de alguns fatores, tais como:

- Função densidade de probabilidade da velocidade;
- Tempo para estabelecer uma chamada ou um *handoff*;
- Raio da célula.

Ao utilizar a aproximação na qual móveis com baixa velocidade se alocam nas micro-células enquanto os de alta velocidade se alocam nas macro-células, a fim de reduzir a taxa de *handoff*, torna-se necessária uma estimativa segura da velocidade do móvel.

Existem alguns métodos para estimativa de velocidade que podem ser descritos, como seguem abaixo:

- Estimativa da frequência Doppler máxima através da análise da envoltória do sinal recebido [10]. A frequência Doppler máxima relaciona-se com a velocidade do móvel através de (3.1):

$$f_d = \frac{V}{\lambda} \quad (3.1)$$

onde V é a velocidade do móvel com relação à base e λ o comprimento de onda.

As figuras 3.5(a) e 3.5(b) abaixo mostram as envoltórias para um usuário veicular trafegando a 60 km/h e para um usuário pedestre respectivamente. A frequência de transmissão é de 900MHz e a taxa de transmissão é de 9600bps.

Este método pode apresentar inconsistências se o espectro do desvanecimento tiver múltiplos máximos locais [11].

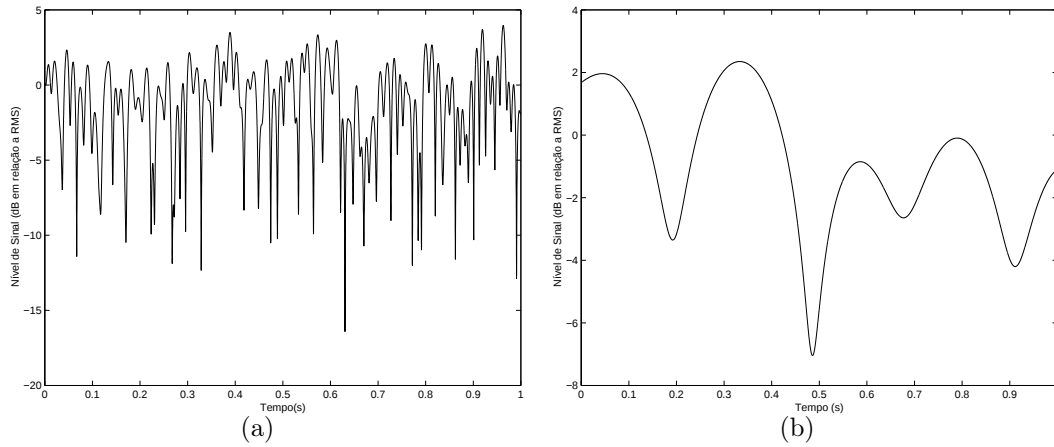


Figura 3.5 Envoltória Rayleigh para usuário veicular (a) e para usuário pedestre (b)

- Utilização de diversidade na recepção. Kawabata et al. [12] relacionam a taxa de troca de ramos de diversidade do receptor com o desvio Doppler para um ambiente com desvanecimento de Rayleigh.

Supondo que um esquema de diversidade de dois ramos com seleção do sinal mais forte, esquematicamente ilustrado na figura 3.6, seja implementado:

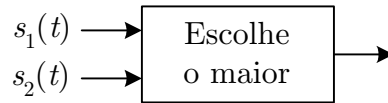


Figura 3.6 Diversidade na Recepção

Definindo $s_1(t)$ e $s_2(t)$ como o nível de sinal nos ramos 1 e 2 respectivamente, e considerando $s_1(t)$ e $s_2(t)$ mutuamente independentes,

$$P(s_1(t) > s_2(t)) = P(s_1(t) < s_2(t)) = 1/2. \quad (3.2)$$

Após um intervalo τ , tem-se que:

$$P(s_1(t + \tau) > s_2(t + \tau)) = P(s_1(t + \tau) < s_2(t + \tau)) = 1/2. \quad (3.3)$$

Com isso, a probabilidade que haja uma troca de ramos (P_{BS}) em um intervalo τ é igual a $1/2$. O desvanecimento, modelado por Jakes, possui função autocorrelação dada por $J_0(2\pi f_d \tau)$, onde J_0 é a função de Bessel de ordem zero que possui o seu primeiro nulo em 2.4, o número esperado de troca de ramos num intervalo τ é dado por:

$$N_{BS} = \frac{P_{BS}}{\tau} = \frac{1}{2} \frac{2\pi f_d}{2.4} = 1.3f_d \quad (3.4)$$

Como pode ser visto em (3.4), o número de troca de ramos é proporcional ao desvio Doppler. Sendo assim, a partir de (3.1) e (3.4) é possível estimar a velocidade do móvel.

Este método, porém, é muito dependente das propriedades estatísticas do desvanecimento, que não são conhecidas *a priori* [13].

- Autocorrelação normalizada entre os valores dos sinais recebidos. É sabido que a densidade espectral de potência de um sinal está relacionada com a função autocorrelação do mesmo [14]. Como o terminal em movimento causa um espalhamento (desvio) Doppler na densidade espectral de potência do sinal é possível concluir que a análise da função autocorrelação destes sinais com desvanecimento pode ser um método eficaz para estimar a velocidade do móvel [11].

Assim, através dos passos a seguir é possível chegar a uma estimativa da velocidade.

- Cálculo da potência instantânea dos sinais recebidos;
 - Filtragem das potências calculadas anteriormente para suprimir o ruído fora de banda;
 - Decimação dos sinais filtrados para redução da carga computacional;
 - Cálculo da função autocorrelação do sinal decimado;
 - A velocidade do móvel é estimada baseada na função autocorrelação normalizada no *time slot* TDMA.
- Em [15] dois métodos para estimar a velocidade são apresentados. Os dois baseiam-se em medições do tempo de estada do móvel em uma célula até mesmo enquanto está inativo. O tempo de permanência é modelado por uma variável aleatória exponencial de média igual a $\frac{1}{c_i v}$, onde c_i é um parâmetro que depende do tipo de célula em que o usuário se encontra. Dois estimadores são apresentados: o de máxima verossimilhança (ML) e o de mínimo erro médio quadrático (MMSE) [16].

Para o estimador ML, a velocidade estimada a partir das últimas n observações do tempo de estada do usuário é dada por:

$$\hat{v}_{ML} = \frac{n}{k} \quad (3.5)$$

onde:

$$k = \frac{1}{\prod_{i=1}^n c_i t_i}$$

Para o estimador MMSE, a velocidade é suposta uniforme entre a e b . Sua estimativa a partir das últimas n observações do tempo de estada do usuário é dada por:

$$\hat{v}_{MMSE} = \frac{n+1}{k} + \frac{a^{n+1}e^{-ka} - b^{n+1}e^{-kb}}{\sum_{i=1}^n \frac{n!}{(n-i)!k!} a^{n-i}e^{-ka} - b^{n-i}e^{-kb}} \quad (3.6)$$

onde:

$$k = \frac{1}{\prod_{i=1}^n c_i t_i}$$

- Utiliza-se um tempo residual de estada dentro da micro-célula depois da chamada ter sido originada [17]. Ocorre um *handoff* nesta chamada de uma micro-célula para uma macro-célula se o tempo decorrido for menor do que um limiar τ_0 pré-estabelecido. Este método não possui grande precisão, devido ao desconhecimento da localização do móvel no instante da originação de chamada. Móveis lentos que originem chamadas na borda de uma micro-célula podem ser designados erroneamente para macro-células.
- Outra estratégia que classifica os usuários em rápidos ou lentos é o *Power Level Offset*. Quando um móvel entra na área de cobertura de uma dada micro-célula, a ERB faz uma compensação negativa do nível de potência do sinal recebido por ela deste móvel fazendo com que a aproximação do móvel diminua a compensação. É oferecido ao móvel um tempo limiar τ para que este compense a diminuição da potência recebida pela ERB. Se um móvel originar uma chamada antes da expiração deste limiar, ele originará a conexão numa macro-célula, caso contrário, o móvel originará a chamada numa micro-célula.
- O móvel rastreia o seu tempo de estada em uma micro-célula até mesmo quando está ocioso e a escolha da célula é baseada na estimativa da média destes tempos de estada comparada com um limiar τ_0 . Este método apresenta bom desempenho porém tem implementação complexa [18].

As amostras dos tempos de estada coletados formam uma sequência aleatória que depende de:

- Trajetória de movimento do móvel;
- Velocidade média do móvel.

Em [18] é apresentado um modelo simplificado de célula para obter a densidade de probabilidade dos tempos de estada. O objetivo é comparar o método que classifica os usuários baseado no tempo residual e o método que se baseia na média dos tempos de estada. O modelo consiste em:

- A célula ser considerada circular de raio R ;
- Os usuários estarem distribuídos uniformemente no sistema celular;
- A direção de movimentação do usuário ser uma variável aleatória uniformemente distribuída de 0 a 2π .

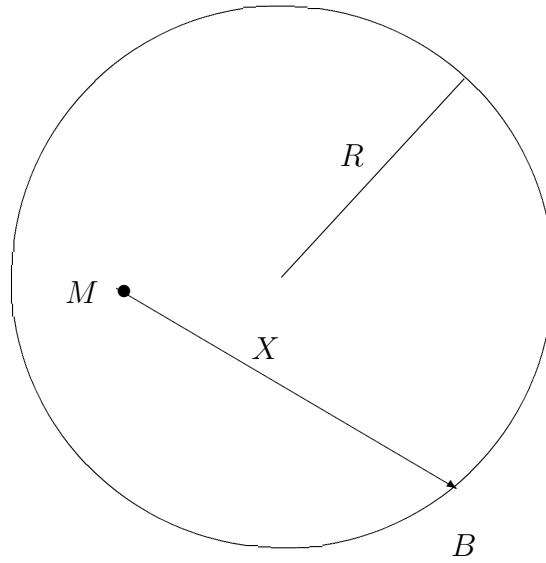


Figura 3.7 Modelo de Célula para Cálculo do Tempo de Estada Residual

Seja uma chamada iniciada no ponto M da figura 3.7, com o móvel percorrendo uma distância X e saindo da célula por um ponto B . Como foi dito anteriormente, a direção de movimento do móvel é uma variável aleatória uniforme entre 0 e 2π , então pode-se determinar a função densidade de probabilidade de X .

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{2}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{x}{2}\right)^2} & \text{para } 0 \leq x \leq 2R \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.7)$$

Assumindo que a velocidade de um móvel é uma variável aleatória. V com função densidade de probabilidade $f(v)$, o tempo de estada no móvel na célula em que se originou a chamada é dado por: $T_X = X/V$.

Como T_X é função de X , a sua função densidade de probabilidade é

facilmente determinada:

$$\begin{aligned} f_{T_X}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} |v| f_X(tv) f(v) dv \\ &= \int_0^{2R/t} \frac{2v}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{tv}{2}\right)^2} f(v) dv \text{ para } t \geq 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Aplicando o valor esperado em (3.8), o tempo médio de estada é obtido por:

$$\begin{aligned} E[T_X] &= \int_0^{\infty} t f_{T_X}(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{2R/t} \frac{2vt}{\pi R^2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{tv}{2}\right)^2} f(v) dv dt \\ &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{\infty} \frac{8R^3}{3v} f(v) dv \\ &= \frac{8RE[\frac{1}{V}]}{3\pi} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Para o cálculo do tempo de permanência em uma micro-célula qualquer considera-se que o móvel entra no ponto A , percorre uma distância Y e sai por um ponto B , conforme mostrado na figura 3.8.

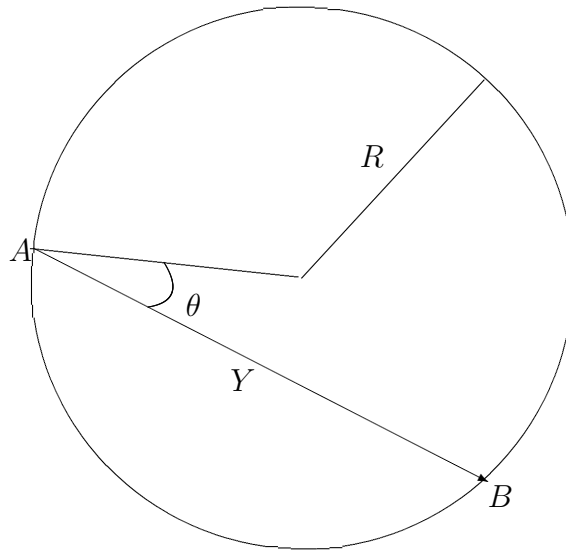


Figura 3.8 Modelo de Célula para Cálculo do Tempo de Estada

$$f_{\alpha}^*(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cos \theta & \text{se } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.10)$$

onde θ é o ângulo entre a normal do contorno da célula e a direção de movimento do móvel.

$$f_V^*(v) = \frac{vf_V(v)}{E[V]} \quad (3.11)$$

$$f_Y(y) = \begin{cases} \frac{y}{2R\sqrt{4R^2-y^2}} & \text{se } 0 \leq y \leq 2R \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3.12)$$

Da mesma forma que (3.8), o tempo de estada no móvel na célula é dado por: $T_Y = Y/V$. Logo:

$$\begin{aligned} f_{T_Y}(t) &= \int_0^\infty v f_Y(tv) f_V^*(v) dv \\ &= \int_0^\infty \frac{v^2 t}{2R\sqrt{4R^2-(tv)^2}} \frac{vf(v)}{E[V]} dv \\ &= \frac{1}{2RE[V]} \int_0^{2R/t} \frac{v^3 t}{\sqrt{4R^2-(tv)^2}} f(v) dv \text{ para } t \geq 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Aplicando o valor esperado em (3.13), o tempo médio de estada é obtido por:

$$\begin{aligned} E[T_Y] &= \int_0^\infty t f_{T_Y} dt \\ &= \frac{1}{2RE[V]} \int_0^\infty \int_0^{2R/t} \frac{v^3 t^2}{\sqrt{4R^2-(tv)^2}} f(v) dv dt \\ &= \frac{1}{2RE[V]} \int_0^\infty v^3 f(v) \frac{\pi R^2}{v^3} dv \\ &= \frac{\pi R}{2E[V]} \end{aligned} \quad (3.14)$$

A partir dos valores de $E[T_X]$ e $E[T_Y]$, [18] mostrou que a probabilidade de classificação errada dos usuários utilizando o tempo residual é muito maior do que utilizando as médias do tempo de permanência na célula. Para um limiar $V_0 = 10\text{km/h}$, os resultados mostram que se o móvel desloca-se a 6m/s , 26% dos usuários são designados erroneamente para a macro-célula quando apenas o tempo residual é utilizado. Já quando foi utilizada a média das cinco últimas amostras do tempo de permanência na célula, obtidas enquanto o móvel estava ocioso, não houve erro de classificação.

3.3

Partição de Espectro em Estruturas Celulares Hierarquizadas

A partição do espectro consiste em dividir os canais, uma parte para as micro-células e outra parte para as macro-células. Os objetivos da partição do espectro são minimizar o número de *handoffs* efetuados e assegurar parâmetros de qualidade de serviço, como por exemplo, a probabilidade de bloqueio máxima de novas chamadas em cada uma das camadas. Esta partição torna-se importante à medida em que aumentam a demanda por canais e a diversidade entre os padrões de mobilidade dos usuários.

A partição é realizável em função de vários fatores, dentre os quais pode-se destacar: a velocidade dos usuários nas micro e macro-células, o número de micro-células cobertas por uma macro-célula, a funcionalidade de cada camada do sistema e a política de prioridade de *handoffs*.

Para se obter uma partição ótima que conduza a um aumento da eficiência do sistema é necessário que se tenha uma classificação ótima dos usuários. Portanto, um conhecimento das características estatísticas da velocidade dos usuários deve ser considerado em qualquer método de partição.

A designação das tarefas a serem realizadas pelas micro-células ou pelas macro-células é outro fator importante na partição, pois permite carregar as camadas com mais ou menos tráfego de acordo com as mesmas. Por exemplo, se uma macro-célula é apenas um servidor de transbordo (estratégia do estouro), isto implica um maior tráfego para as micro-células, e portanto devem ser disponibilizados mais canais para estas. Em contrapartida, mais canais devem ser dados à uma macro-célula se ela tiver a função de aumentar a eficiência do uso de recursos.

Quanto à política de prioridade de *handoffs*, uma análise de sua influência na partição ótima pode ser encontrada no exemplo a seguir.

3.3.1

Exemplificando uma Partição de Espectro

Em [19, 20] foi analisado a partição do espectro para um sistema hierarquizado com duas camadas que utilizava a estratégia clássica não-reversível. O sistema possui um total de 20 canais. O fator de reuso para as duas camadas foi estipulado em 7. A probabilidade de bloqueio máxima de novas chamadas nas duas camadas é de 2% e o limiar de velocidade V_0 para seleção de camadas é de 17m/s. Também é definido um limitante superior de velocidade V_L a partir do qual os usuários não podem mais ser cobertos pelas micro-células pois o número de *handoffs* por unidade de tempo efetuados por esses usuários

é maior do que as micro-células podem acomodar. Neste exemplo $V_L = V_0$. A função densidade de probabilidade da velocidade dos usuários, em m/s, é dada por :

$$f_v(V) = \begin{cases} V/100 & \text{para } 0 \leq V \leq 10 \\ -V/100 + 0.2 & \text{para } 10 < V \leq 20 \end{cases} \quad (3.15)$$

No que tange a priorizar o procedimento de *handoff* duas situações foram estudadas: NPS (*non priority scheme*, sem prioridade para *handoff*) nas duas camadas e RCS (*reserved channel scheme*, canal de guarda reservado para *handoff*) nas duas camadas.

Quando o NPS foi utilizado nas duas camadas, a partição ótima foi alcançado quando 7 canais foram oferecidos para as macro-células e 13 para as micro-células (7,13). Esta partição foi considerada ótima pois foi aquela que conseguiu ofertar mais tráfego sem violar as restrições de probabilidade de bloqueio. Outras combinações, como a (9,11) a (6,14) e a (5,15) não violam a restrição de probabilidade de bloqueio, mas para a distribuição de velocidades de usuários em questão, oferecem menor capacidade de tráfego devido ao limitante superior de velocidade V_L .

Quando o RCS foi utilizado nas duas camadas, com 1 canal de guarda reservado para *handoff* em cada uma, a partição ótima foi alcançada quando 8 canais foram oferecidos para as macro-células e 12 para as micro-células (8,12). A explicação para este aumento de canais para as macro-células está no fato de que como a taxa de falha de *handoffs* caiu nas micro-células, um número maior de novas chamadas de usuários lentos deve ser transbordado para as macro-células. Isto, combinado com o fato de as macro-células também possuírem 1 canal de guarda aumenta a probabilidade de bloqueio nesta camada. Vale ressaltar que o tráfego máximo oferecido no caso RCS é menor do que no caso NPS.

Para as simulações realizadas neste trabalho, foi adotado o esquema NPS nas duas camadas e a implementação de canais de guarda para *handoffs* foi deixada como sugestão de trabalho futuro.