

# Análise da Capacidade de Sistemas CDMA em Ambientes Fechados

Marcio Ricardo Vieira e Celso de Almeida  
Departamento de Comunicações  
FEEC - UNICAMP

marciurv@decom.fee.unicamp.br, celso@decom.fee.unicamp.br

## RESUMO

Neste trabalho será analisada a capacidade, para o enlace reverso, de um sistema CDMA em ambientes fechados, utilizando-se um arranjo de células quadradas com controle de potência realizado por uma dentre as três ERBs (Estação Rádio Base) mais próximas. Também são propostas equações que modelam a capacidade deste sistema, assim como é feita uma análise da validade das mesmas. Considerou-se os efeitos dos seguintes parâmetros: a monitoração da atividade de voz e sombreamento lognormal sofrido pelos usuários das células. A probabilidade da perda de desempenho ("Outage Probability") também foi obtida e analisada.

## 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, é feita a análise da capacidade de sistemas CDMA em ambientes fechados para o enlace reverso.

Muitos trabalhos já foram realizados no sentido de se obter os parâmetros de propagação de canal para ambientes fechados [1], [2], [3]. Além disso, já foi feito um estudo dos efeitos na capacidade de um sistema CDMA em ambientes fechados, considerando pequenas células associadas com terminais de antenas direcionais [4], onde cada terminal é composto por um arranjo de antenas. Além disso, foi usada diversidade temporal na forma de receptores Rake, fazendo com que a capacidade do sistema melhorasse em muito. Entretanto, consideramos diversidade temporal em ambientes fechados não é muito razoável, visto que precisaríamos de taxas muito altas de transmissão para conseguirmos aumento na diversidade, o que não acontece na prática. Apesar de bons, estes resultados foram obtidos através de simulação. Existem muitas vantagens em se obter expressões analíticas, que possam descrever com fidelidade o comportamento obtido através de simulação, entre as quais podemos citar a facilidade na análise do sistema já que não é necessário construir um simulador, o que devido a sua dimensão é sempre uma fonte de problemas. Por esta razão, estamos interessados em propor equações que retratem a capacidade destes sistemas baseados nesses parâmetros de propagação de canal já obtidos. Além disso, obtivemos a probabilidade da perda de desempenho ("Outage Probability"), que é a probabilidade do sistema estar operando abaixo de uma relação sinal-interferência mínima, parametrizada em função de diversos parâmetros como: atividade de voz, sombreamento, perda de percurso e erro no controle de potência, utilizados para a análise da capacidade do sistema.

## 2. MODELAGEM DO SISTEMA

Neste trabalho, consideramos um ambiente fechado subdividido em nove salas quadradas, todos eles de mesma área. As salas são separadas por paredes que oferecem resistência à propagação

do sinal. Neste modelo não está se considerando corredores, janelas ou outros fatores que possam alterar a propagação do sinal. Cada sala contém uma ERB (Estação Rádio Base) localizada no seu centro e além disso, o móvel pode se comunicar com uma dentre as 3 ERBs mais próximas, como pode ser visto na Fig 1, onde  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  representam as distâncias entre o móvel e a ERB com a qual ele está mantendo contato.

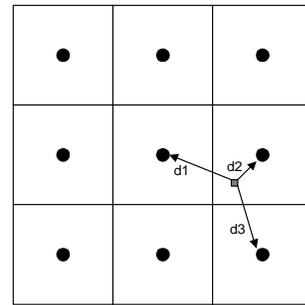


Fig. 1. Arranjo de múltiplas células com uma ERB por sala.

Consideramos a célula central como nossa célula de referência, e assim, a interferência que queremos calcular será oriunda dos usuários conectados a outras estações rádio base, que não a célula central, já que esta pode ser considerada determinística se não levarmos em consideração erros no controle de potência. Para isto, consideramos cada sala como um quadrado de lado  $L$ , e utilizamos coordenadas cartesianas  $x$  e  $y$  para descrever a posição do usuário dentro da célula. Os usuários são uniformemente distribuídos dentro da célula e estão sujeitos a: sombreamento lognormal, monitoração da atividade de voz, atenuação de parede e de perda de percurso. Também iremos considerar controle de potência ideal.

### 2.1 Controle de potência realizado por 1 ERB

Quando, uma certa ERM (Estação Rádio Móvel) é controlada pela ERB mais próxima, a potência que chega nesta ERM no canal direto é dada por:

$$P_{R,M} = P_{T,B} r^{-\beta} z_d \quad (1)$$

onde  $P_{R,M}$  é a potência que chega até a ERM que dista  $r$  da ERB e  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $P_{T,B}$  é a potência transmitida pela ERB,  $z_d$  é o sombreamento no canal direto,  $\beta$  é o expoente da perda de percurso. Baseado em dados experimentais, o sombreamento é modelado como uma variável aleatória (VA) lognormal com média de 0 dB e desvio padrão de  $\sigma$  dB [5]. O controle de potência tenta compensar não somente a perda de percurso, como também o sombreamento. Deste modo, a ERM, no sentido de compensar a perda de percurso e sombreamento do enlace direto, transmite uma potência igual a:

$$\frac{P_r^\beta}{z_d} \quad (2)$$

onde  $P$  é a potência que deve chegar na ERB em questão. A potência que chega na ERB da célula central, devido a um usuário localizado numa célula adjacente, é igual a:

$$\frac{Pr^\beta}{z_d} d^{-\beta} z_r \quad (3)$$

onde a potência transmitida é igual a  $P(r) = \frac{Pr^\beta}{z_d}$ ,  $z_r$  é o sombreamento do canal reverso modelado da mesma maneira que no canal direto, e  $d$  é a distância entre a ERM e a ERB central.

O quociente entre essas duas VAs lognormais, que será representado por  $z$ , é também uma VA lognormal com média nula e desvio padrão  $\sqrt{2}$  vezes maior que o desvio padrão das VAs lognormais individuais.

Deste modo, a interferência média normalizada proveniente dos usuários que não estão se comunicando com a ERB central é dada por:

$$\frac{I}{NP} = \alpha \int_0^\infty zp(z)dz \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^i} \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta} p(x)p(y) dx dy \quad (4)$$

onde  $w = 10^{\frac{w_{dB}}{10}}$  representa a atenuação de 1 parede,  $w_{dB}$  é a atenuação de parede dada em dB,  $\alpha$  é o fator da atividade de voz,  $N$  é o número de usuários de cada célula,  $C$  é o número de camadas ("tier"),  $M_i$  é o número de células adjacentes na  $i^{\text{ésima}}$  camada,  $d_i$  é a distância de um usuário de uma célula adjacente da  $i^{\text{ésima}}$  camada até a ERB da célula central,  $p(x) = \frac{1}{L}$  e  $p(y) = \frac{1}{L}$ .

Neste caso mais simples, como verificamos na Fig. 1, temos apenas 2 camadas, portanto  $M_1 = M_2 = 4$ ,  $C = 2$  e  $d_i$  pode ser obtido por:

$$d_1 = \sqrt{(L+x)^2 + y^2} \quad (5)$$

$$d_2 = \sqrt{(L+x)^2 + (L+y)^2} \quad (6)$$

A integral  $\int_0^\infty zp(z)dz$  apresenta fórmula fechada bem como seu valor quadrático médio :

$$\int_0^\infty zp(z)dz = e^{(m_{\log} + \frac{\sigma_{\log}^2}{2})} \quad (7)$$

$$\int_0^\infty z^2 p(z)dz = e^{(2m_{\log} + 2\sigma_{\log}^2)} \quad (8)$$

onde  $m_{\log}$  é a média logarítmica e  $\sigma_{\log}$  é o desvio padrão logarítmico, dados por:

$$m_{\log} = \int_0^\infty \log_e(z)p(z)dz \quad (9)$$

$$\sigma_{\log} = \sqrt{\int_0^\infty \log_e^2(z)p(z)dz - \left[ \int_0^\infty \log_e(z)p(z)dz \right]^2} \quad (10)$$

A média e o desvio padrão em dB se relacionam com a média e o desvio padrão logarítmicos através de:

$$m_{dB} = m_{\log} \frac{10}{\log_e(10)} \quad (11)$$

$$\sigma_{dB} = \sigma_{\log} \frac{10}{\log_e(10)} \quad (12)$$

Da mesma maneira podemos escrever a variância normalizada da interferência como:

$$\frac{\sigma_I^2}{NP^2} = \alpha \int_0^\infty z^2 p(z)dz \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2i}} \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta} p(x)p(y) dx dy - \alpha^2 \left( \int_0^\infty zp(z)dz \right)^2 \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2i}} \left( \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta} p(x)p(y) dx dy \right)^2 \quad (13)$$

Infelizmente estas integrais não apresentam fórmula fechada e seus valores têm que ser calculados numericamente.

## 2.2 Controle de potência realizado por 2 ERBs

Quando uma certa ERM é controlada por duas ERBs, a potência que chega nesta ERM no canal direto é dada por:

$$P_{R,M} = \max\{P_{T,B_I} r_I^{-\beta} z_{d,I}, P_{T,B_{II}} r_{II}^{-\beta} z_{d,II}\} \quad (14)$$

onde  $r_I$  é a distância entre a ERB<sub>I</sub> e a ERM,  $r_{II}$  é a distância entre a ERB<sub>II</sub> e a ERM,  $P_{T,B_I}$  é a potência transmitida pela ERB<sub>I</sub>,  $P_{T,B_{II}}$  é a potência transmitida pela ERB<sub>II</sub>,  $z_{d,I}$  é o sombreamento no canal direto entre a ERB<sub>I</sub> e a ERM, e  $z_{d,II}$  é o sombreamento no canal direto entre a ERB<sub>II</sub> e a ERM. Estas duas VAs que representam o sombreamento no canal direto são independentes entre si.

O controle de potência tenta compensar não somente a perda de percurso, como também o sombreamento, ou seja, a ERM transmite uma potência igual a :

$$\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{z_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{z_{d,II}}\right\} \quad (15)$$

A potência que chega na ERB da célula central, devido a um usuário localizado numa célula adjacente, é igual a:

$$\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{z_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{z_{d,II}}\right\} d^{-\beta} z_r \quad (16)$$

onde a potência transmitida pela ERM é igual a  $\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{z_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{z_{d,II}}\right\}$ ,  $z_r$  é o sombreamento que atinge o canal reverso, modelado da mesma maneira que no canal direto. O sombreamento do canal reverso é suposto ser independente do canal direto. Deste modo, aproximações foram feitas para o cálculo da potência transmitida pela ERM e assim, podemos escrever a interferência média normalizada aproximada como:

$$\frac{I}{NP} \cong \alpha \overline{\min(z_{d,I}, z_{d,II})} \int_0^\infty z_r p(z_r) dz_r \sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^i} \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta} p(x)p(y) dx dy \quad (17)$$

onde usou-se a desigualdade da média do mínimo de duas VAs fatoráveis desenvolvido no apêndice de [6], e obtivemos as seguintes equações:

$$\overline{\min(z_1, z_2)} = \int_0^\infty zp(z) \{1 - \text{erf}\left[\frac{\log_e(z)}{\sqrt{2}\sigma}\right]\} dz \quad (18)$$

$$\overline{\min^2(z_1, z_2)} = \int_0^\infty z^2 p(z) \{1 - \text{erf}\left[\frac{\log_e(z)}{\sqrt{2}\sigma}\right]\} dz \quad (19)$$

onde  $\text{erf}(x) = \int_0^x \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-t^2} dt$ .

De forma análoga podemos escrever a variância normalizada da interferência aproximada como:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} &\cong \overline{\alpha_{\min}(z_{d,I}, z_{d,II})}^2 \int_0^\infty z_r^2 p(z_r) dz_r \\ &\sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2i}} \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta} p(x)p(y) dx dy - \\ &\left( \overline{\alpha_{\min}(z_{d,I}, z_{d,II})} \right)^2 \left( \int_0^\infty z_r p(z_r) dz_r \right)^2 \\ &\sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2i}} \left( \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta} p(x)p(y) dx dy \right)^2 \end{aligned} \quad (20)$$

### 2.3 Controle de potência realizado por 3 ERBs

Da mesma forma, quando uma certa ERM é controlada por 3 ERBs, a potência que chega nesta ERM no canal direto é dada por:

$$P_{R,M} = \max\{P_{T,B_I} r_{I,I}^{-\beta} z_{d,I}, P_{T,B_{II}} r_{II,I}^{-\beta} z_{d,II}, P_{T,B_{III}} r_{III,I}^{-\beta} z_{d,III}\} \quad (21)$$

onde  $r_i$  é a distância entre a ERB<sub>*i*</sub> e a ERM,  $P_{T,B_i}$  é a potência transmitida pela ERB<sub>*i*</sub>,  $z_{d,i}$  é o sombreamento no canal direto entre a ERB<sub>*i*</sub> e a ERM.

O controle de potência tenta compensar não somente a perda de percurso, como também o sombreamento, ou seja, a ERM transmite uma potência igual a :

$$\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{z_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{z_{d,II}}, \frac{Pr_{III}^\beta}{z_{d,III}}\right\} \quad (22)$$

A potência que chega na ERB da célula central, devido a um usuário localizado numa célula adjacente, é igual a:

$$\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{z_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{z_{d,II}}, \frac{Pr_{III}^\beta}{z_{d,III}}\right\} d^{-\beta} z_r \quad (23)$$

onde  $\min\left\{\frac{Pr_I^\beta}{z_{d,I}}, \frac{Pr_{II}^\beta}{z_{d,II}}, \frac{Pr_{III}^\beta}{z_{d,III}}\right\}$  é a potência transmitida pela ERM. Podemos escrever a interferência média normalizada aproximada como:

$$\begin{aligned} \frac{I}{NP} &\cong \overline{\alpha_{\min}(z_{d,I}, z_{d,II}, z_{d,III})} \int_0^\infty z_r p(z_r) dz_r \\ &\sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^i} \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta} p(x)p(y) dx dy \end{aligned} \quad (24)$$

onde usou-se a desigualdade da média do mínimo de três VAs fatoráveis desenvolvido no apêndice de [6], e obtivemos as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \overline{\min(z_1, z_2, z_3)} &= 3 \int_0^\infty zp(z) \\ &\left\{\frac{1}{2}\left[1 - \text{erf}\left(\frac{\log_e(z)}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right]\right\}^2 dz \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \overline{\min^2(z_1, z_2, z_3)} &= 3 \int_0^\infty z^2 p(z) \\ &\left\{\frac{1}{2}\left[1 - \text{erf}\left(\frac{\log_e(z)}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right]\right\}^2 dz \end{aligned} \quad (26)$$

De forma análoga podemos escrever a variância normalizada da interferência aproximada como:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_I^2}{NP^2} &\cong \overline{\alpha_{\min}(z_{d,I}, z_{d,II}, z_{d,III})}^2 \int_0^\infty z_r^2 p(z_r) dz_r \\ &\sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2i}} \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^{2\beta} d_i^{-2\beta} p(x)p(y) dx dy - \\ &\left( \overline{\alpha_{\min}(z_{d,I}, z_{d,II}, z_{d,III})} \right)^2 \left( \int_0^\infty z_r p(z_r) dz_r \right)^2 \\ &\sum_{i=1}^C \frac{M_i}{w^{2i}} \left( \iint_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} r^\beta d_i^{-\beta} p(x)p(y) dx dy \right)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

### 3. SIMULAÇÃO

As considerações feitas para o desenvolvimento das equações dadas na seção anterior, também foram feitas ao criarmos um simulador na forma de um programa em linguagem C que nos desse a interferência média normalizada à qual está submetida uma dada estação rádio base no link reverso (no nosso caso a ERB central), bem como o desvio padrão normalizado dessa interferência. Os móveis foram aleatoriamente distribuídos nas 9 salas já mostradas na Fig. 1. Os valores a serem utilizados para os parâmetros: atenuação de parede e de perda de percurso, atividade de voz e desvio padrão do sombreamento lognormal, serão baseados nos valores obtidos experimentalmente em [1], [2], [3].

O expoente da perda de percurso é um dos parâmetros que apresenta uma grande variação em ambientes internos, com valores que vão desde  $\beta = 1,8$  no caso de termos a propagação ao longo de um corredor, até  $\beta = 6,7$  no caso de termos a propagação em um ambiente com muitas obstruções e grande presença de superfícies metálicas [2].

Várias medições já foram feitas com o intuito de se saber o quanto uma parede pode influir na propagação do sinal, e verificou-se que esse fator varia muito, de acordo com o material empregado na construção da parede, com valores que vão de  $w_{dB} = 1,5$  dB no caso de hangares que não apresentam estruturas internas, até  $w_{dB} = 7,8$  dB no caso de escritórios construídos com tijolos e concreto reforçado com aço [1], [2], [3]. Assim como nas equações, também foi considerado que cada estação móvel é controlada por uma dentre as 3 estações rádio base mais próximas [5], [6], onde se escolhe, para fins de comunicação, aquela que apresenta a menor perda incluindo o sombreamento, atenuação de paredes e da perda de percurso, função essa executada pelo controle de potência considerado ideal.

Desta forma, escolhemos como parâmetros de simulação:  $L = 10$  m,  $\beta = 2,2$ ,  $w_{dB} = 4$  dB,  $\alpha = 0,375$  e o desvio padrão do sombreamento lognormal variando de 2 dB a 7 dB.

As Figs. 2 e 3 mostram que as equações propostas para um móvel sendo controlado por apenas 1 ERB se apresentam bastante válidas.

A Fig. 4 nos mostra que as equações apresentadas para o cálculo da interferência média normalizada não se apresentaram tão boas como no caso anterior.

A Fig. 5 mostra que as equações apresentadas para o desvio padrão nos dão uma melhor aproximação do que o caso das médias, além disso, as equações se apresentam de forma pessimista visto que o desvio padrão obtido com a simulação é sempre menor que o desvio padrão obtido pelas equações.

### 4. OUTAGE PROBABILITY

A probabilidade da perda de desempenho ("Outage Probability"), é a probabilidade do sistema estar operando abaixo de uma relação sinal-interferência mínima. Sistemas CDMA apresentam relação sinal-interferência recebida dada por:

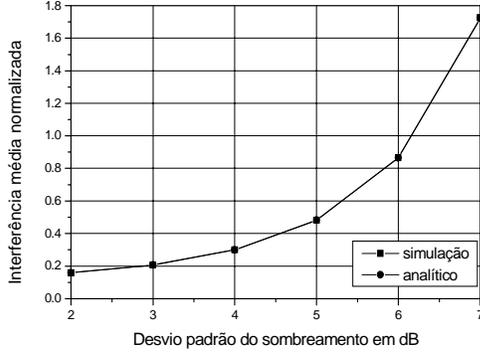


Fig. 2. Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com  $\beta = 2, 2$ ,  $\alpha = 0, 375$ ,  $w_{dB} = 4$  dB.

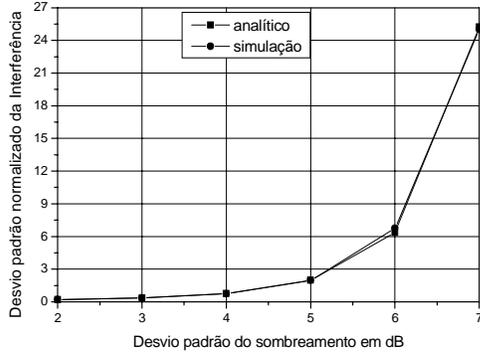


Fig. 3. Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com  $\beta = 2, 2$ ,  $\alpha = 0, 375$ ,  $w_{dB} = 4$  dB.

$$\frac{C}{I} = \frac{P_U}{P_I + P_O} \quad (28)$$

onde  $P_U$  é a potência proveniente de um usuário de referência,  $P_I$  é a potência interferente proveniente da célula deste usuário, e  $P_O$  é a potência interferente proveniente das outras células. Vale ressaltar que as equações propostas, obtidas anteriormente, nos dão o valor médio e o desvio padrão normalizado do termo  $P_O$ . Já para o caso de  $P_I$ , sabemos que dentro da própria célula temos  $(N - 1)$  usuários interferentes, transmitindo a uma potência  $P$ . Deste modo, considerando controle de potência ideal, podemos normalizar  $P_I$  e calcular sua média e desvio padrão normalizados como:

$$\frac{m_{P_I}}{(N - 1)P} = \alpha \quad (29)$$

$$\frac{\sigma_{P_I}}{\sqrt{N - 1}P} = \sqrt{\alpha(1 - \alpha)} \quad (30)$$

A probabilidade da perda de desempenho pode ser definida como:

$$P_{OUT} = \Pr\left(\frac{C}{I} < \frac{\gamma_b}{G_P}\right) \quad (31)$$

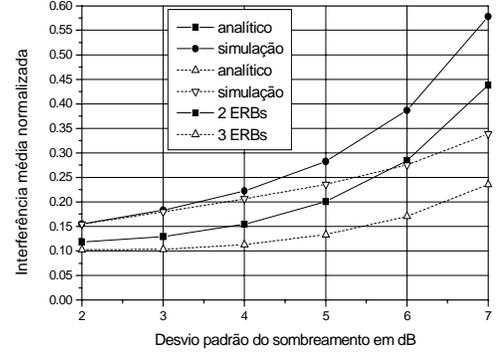


Fig. 4. Interferência média normalizada em função do desvio padrão do sombreamento, com  $\beta = 2, 2$ ,  $\alpha = 0, 375$ ,  $w_{dB} = 4$  dB, para controle de potência realizado por 2 e 3 ERBs.

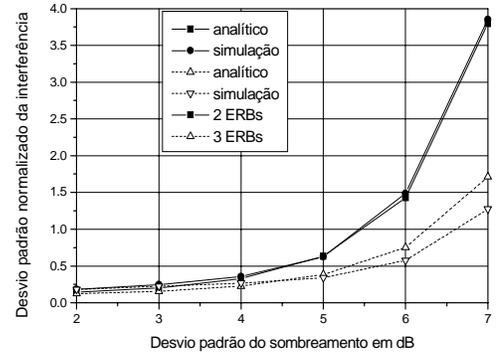


Fig. 5. Desvio padrão normalizado da interferência em função do desvio padrão do sombreamento, com  $\beta = 2, 2$ ,  $\alpha = 0, 375$ ,  $w_{dB} = 4$  dB, para controle de potência realizado por 2 e 3 ERBs.

onde  $\gamma_b = \frac{E_b}{I_0}$  é a relação sinal-interferência para se atingir uma certa probabilidade de erro, e  $G_P$  é o ganho de processamento.

Vamos modelar  $P_U$  e  $P_I$  em (28) como VAs que têm distribuição binomial, pois estamos considerando controle de potência ideal, e  $P_O$  como uma VA que tem distribuição lognormal. Como a variância de  $P_I$  é bem menor que a de  $P_O$ , podemos considerar que a VA  $P_O$  é dominante, portanto podemos dizer que a soma das VAs  $P_I + P_O$  também tem distribuição lognormal. Se o controle de potência não fosse ideal, modelaríamos  $P_U$  e  $P_I$  como VAs com distribuição lognormal, e da mesma forma a soma das VAs  $P_I + P_O$  também teria distribuição lognormal, pois segundo o teorema de Fenton [7], a soma de VAs lognormais dá origem a outra VA lognormal. Podemos definir a interferência total como:  $P_\Sigma = P_I + P_O$ . Deste modo, usaremos que a variável soma tem média e desvio padrão iguais a:

$$m_\Sigma = m_{P_I} + m_{P_O} \quad (32)$$

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{P_I}^2 + \sigma_{P_O}^2} \quad (33)$$

Logo, podemos calcular a probabilidade de perda de desempenho usando (31) como:

$$P_{OUT} = \int_0^\infty p(P_\Sigma) \int_0^{P_\Sigma \frac{\gamma_b}{G_P}} p(P_U) dP_U dP_\Sigma \quad (34)$$

onde  $p(P_\Sigma)$ , e  $p(P_U)$  são as funções densidades de probabilidade das variáveis  $P_\Sigma$ , e  $P_U$ , respectivamente.

## 5. RESULTADOS

Vamos obter a probabilidade da perda de desempenho ("outage probability") usando (34). Este cálculo foi feito em função do número de usuários e parametrizado em função de diversos fatores como: desvio padrão do erro do controle de potência, atividade de voz, expoente da perda de percurso e desvio padrão do somreamento. Para isso, consideramos o ganho de processamento  $G_P = 100$ , e relação sinal-ruído  $\gamma_b = 5$ . Podemos verificar nas Figs. 6, 7, 8 e 9 que quando temos 3 ERBs em contato com o móvel, a probabilidade de falha é bem menor do que quando temos apenas 1 ERB em contato, o que significa que temos um grande aumento da capacidade do sistema, o que é sempre o nosso maior objetivo. A Fig. 6 apresenta a "outage probability" em função do número de usuários, parametrizada em função do desvio padrão do erro do controle de potência realizado por 1 ou 3 ERBs. Podemos ver que um erro no controle de potência acima de  $\sigma = 1$  dB começa a se tornar um problema, como por exemplo, podemos ver o caso em que  $\sigma = 2$  dB onde a capacidade do sistema sofre uma grande diminuição (5 usuários) para uma probabilidade de falha de  $10^{-1}$ . Isto se deve ao fato de que a variável envolvida no controle de potência é uma VA lognormal, e desta forma quanto maior o valor de  $\sigma$  maior será a dificuldade do controle de potência compensar as flutuações em torno do sinal causada por essa VA lognormal.

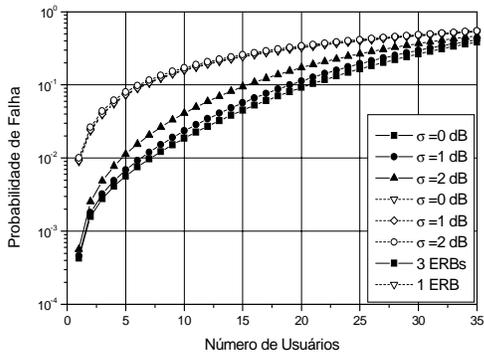


Fig. 6. "Outage Probability" em função do número de usuários, para desvio padrão do somreamento igual a  $\sigma = 7$  dB,  $\beta = 3$ , e  $\alpha = 0, 4$ .

A Fig. 7 nos dá a "outage probability" em função do número de usuários parametrizada em função da atividade de voz. Podemos notar que a probabilidade de falha é tanto menor, quanto menor for a atividade de voz dos móveis.

A Figs. 8 nos mostra a "outage probability" em função do número de usuários, parametrizada em função do expoente de perda de percurso. Podemos notar que quanto maior  $\beta$  maior será a capacidade do sistema. Claro que não podemos aumentar  $\beta$  de acordo com a nossa vontade pois sabemos que seu valor geralmente está entre  $2 \leq \beta \leq 7$  conforme dito anteriormente. Este aumento na capacidade do sistema se deve ao fato de, com esse aumento, estarmos diminuindo a interferência externa oriunda dos usuários conectados a outras ERBs que não a central.

A Fig. 9 nos dá a "outage probability" em função do número de usuários, parametrizada em função do desvio padrão do somreamento. Podemos ver que o desvio padrão do somreamento influi bastante na capacidade do sistema, pois de forma análoga ao controle de potência, o somreamento é modelado por uma VA lognormal e como os valores de  $\sigma$  neste caso são bem maiores, as flutuações que ocorrem em torno do sinal também são maiores.

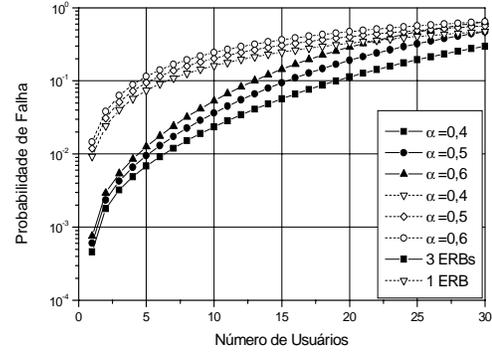


Fig. 7. "Outage Probability" em função do número de usuários, para desvio padrão do somreamento igual a  $\sigma = 7$  dB,  $\beta = 3$ , e desvio padrão do erro do controle de potência igual a  $\sigma = 1$  dB.

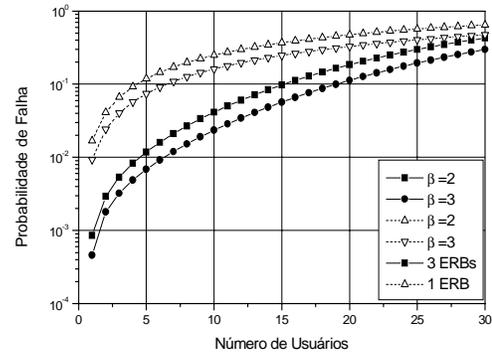


Fig. 8. "Outage Probability" em função do número de usuários, para desvio padrão do somreamento igual a  $\sigma = 7$  dB, desvio padrão do erro do controle de potência igual a  $\sigma = 1$  dB, e  $\alpha = 0, 4$ .

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo foram obtidos resultados que mostram a capacidade de um sistema CDMA em ambiente fechado para o enlace reverso, bem como se propôs equações que modelam esse sistema.

Através da análise dos dados experimentais com os dados obtidos das equações propostas mostrados nas Figs. 2, 3, 4 e 5, pudemos ter uma idéia da precisão atingida pelas equações na modelagem do sistema. Verificamos, que para o caso em que temos apenas uma ERB em contato com a ERM as equações se apresentam de forma bastante satisfatória, já para o caso em que temos duas ou três ERBs em contato com a ERM, as aproximações feitas para o cálculo da média, não se apresentaram tão boas como para o cálculo do desvio padrão. Como o desvio padrão é dominante, visto que seus valores são bem mais expressivos que os valores obtidos para a média, e como as equações obtidas para o cálculo do desvio padrão se apresentaram de forma pessimista, o efeito destes erros no valor médio da interferência acabou sendo amenizado.

Além disso, também foi analisada a probabilidade da perda de desempenho, "outage probability", para vários parâmetros, mostrando que o somreamento apresenta uma grande influência no desempenho do sistema. A capacidade deste sistema, pode ser melhorada utilizando-se um arranjo linear de antenas para as ERBs na recepção do sinal, ou se considerarmos setorização com o uso de antenas direcionais. Fatores estes que não

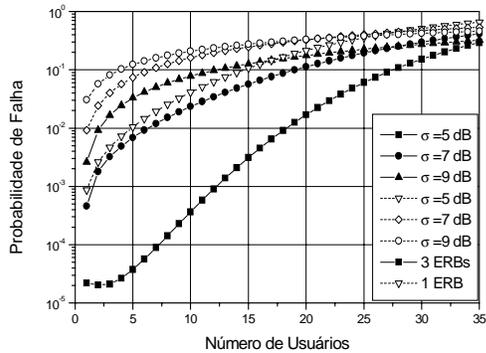


Fig. 9. "Outage Probability" em função do número de usuários, desvio padrão do erro do controle de potência igual a  $\sigma = 1$  dB,  $\alpha = 0, 4$ , e  $\beta = 3$ .

foram considerados neste trabalho.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. M. D. Turkmani and A. F. Toledo, "Estimating Coverage of Radio Transmission into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz", *IEEE Pers. Commun.*, pp 40-47, April 1998.
- [2] H. Hashemi, "The Indoor Propagation Channel", *Proceedings of the IEEE*, vol.81, pp. 943-968, July 1993.
- [3] A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation", *IEEE Journal Selected Areas in Communications*, vol.SAC 5, pp. 128-137, February 1987.
- [4] A. Kajiwara, "Effects of Cell Size, Directional Antenna, Diversity and Shadowing on Indoor Radio CDMA Capacity", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, No.1, pp 242-247, February 1997.
- [5] K. S. Gilhousen, J. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, and C. E. Wheatley III "On the Capacity of a Cellular CDMA System", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-40, pp.302-312, Aug.1991.
- [6] Celso de Almeida, "Cálculo de Capacidade de Sistemas CDMA", *Tese de Livre Docência*, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1998.
- [7] L. F. Fenton, "The Sum of a Log-normal Probability Distribution in a Scattered Transmission System", *IRE Trans.*, vol.C5, pp. 56-67, Mar 1960.
- [8] J. G. Proakis, "Digital Communications" McGraw-Hill, New York, 3<sup>rd</sup> edition, 1993.