

# ANÁLISE DE SISTEMAS MICROCELULARES INTEGRADOS POR FIBRAS ÓPTICAS

L. V. de Souza e J. C. W. A. Costa

jweyl@ufpa.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, CP: 8619, CEP: 66623-000, Belém-PA-Brasil.

**Abstract** – This paper show the results from the analysis of microcell system integrated by optical links. It is used four propagation models with link optical model, where systems parameters like optical modulation index, height of transmission antenna are under analysis.

## I. INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas microcelulares integrados por fibras ópticas é uma solução para prover um meio físico de interconexão confiável e com grande largura de banda disponível. Uma forma proposta é o uso de uma estação rádio base passiva (ERBP), a qual é essencialmente uma antena, em cada microcélula, conectada a estação base central (EBC) via um enlace de fibra óptica [1]. Neste esquema, todo controle e inteligência é colocado na EBC, a qual é localizada remotamente em relação a microcélula.

Para se conseguir tal objetivo, é necessária a utilização de um esquema de multiplexação de subportadora (SCM), onde os sinais recebidos dos diversos usuários móveis em uma microcélula modulam um único diodo laser localizado na ERBP. O sinal de luz modulado é enviado a EBC via enlace óptico. No caso do *uplink* (transmissão ERBP-EBC), um comprimento de onda  $\lambda_1$  é utilizado para a transmissão do sinal óptico. Na EBC, o sinal é detectado por um fotodiodo PIN e então demodulado. No *downlink* (transmissão EBC-ERBP), a mesma fibra óptica pode ser utilizada para o envio de informações de controle e mensagens aos assinantes de uma mesma microcélula, em um comprimento de onda  $\lambda_2$ . Desta forma, a comunicação entre a ERBP e a EBC pode ser feita utilizando uma única fibra monomodo, através de uma configuração de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM). Tal solução é mostrada na Figura 1 [1].

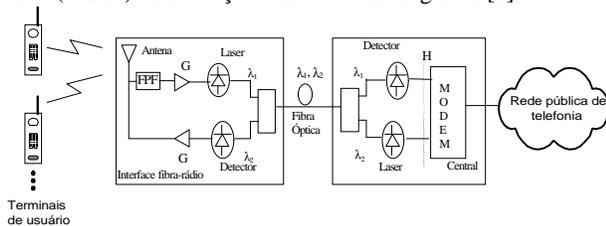


Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de estações microcelulares interligadas por fibras ópticas

A integração entre a tecnologia de comunicações ópticas com a tecnologia de comunicação por sistemas móveis provê um meio físico de interligação entre ERBP e EBC de alta capacidade de transmissão e alta largura de banda disponível, sendo uma forma de suprir a demanda por serviços banda-larga, tais como videoconferência, transmissão de dados a altas taxas entre outros. Desta forma, um modelamento de parâmetros destes sistemas é desejável, pois permite uma análise mais acurada de algumas variáveis envolvidas no processo.

Este artigo está dividido da seguinte forma: a Seção II apresenta o modelamento matemático para o sistema óptico; a Seção III descreve os modelos de propagação utilizados; a Seção IV mostra os resultados obtidos e a Seção V conclui este trabalho.

## II. MODELAMENTO DO ENLACE ÓPTICO

Considerando-se que o enlace ótico entre a ERBP e a EBC opera com a tecnologia de intensidade de modulação por detecção direta, desconsiderando-se ainda o uso de amplificadores ópticos, a relação portadora-ruído (CNR), adimensional, é dada por [1]

$$CNR = \frac{0,5 m_o^2 I_o^2}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \quad (1)$$

sendo  $m_o$  o índice de modulação óptica (OMI).  $I_o$  é a corrente na saída do fotodetector em Ampères, e é dada por [1]

$$I_o = \rho P_o 10^{-(\alpha L + 2C)/10} \quad (2)$$

sendo  $\rho$  é a responsividade do fotodetector (A/W),  $P_o$  é a potência óptica média (W) do laser acoplada na fibra,  $\alpha$  é a atenuação da fibra óptica (dB/km),  $L$  é o comprimento da mesma (km),  $C$  é a atenuação em cada acoplador (dB), caso a mesma fibra seja utilizada para transmissão e recepção. Os termos  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  e  $n_5$  representam as contribuições de potência (Ampères<sup>2</sup>) devido ao ruído térmico, ruído balístico, ruído de intensidade relativa (RIN), ruído de intermodulação e ruído de saturação (*clipping*), respectivamente, definidos como segue [1]:

$$n_1 = \langle t \rangle^2 B \quad (3)$$

$$n_2 = 2qI_o B \quad (4)$$

$$n_3 = (RIN)I_o^2 B \quad (5)$$

$$n_4 = v_c P_{3rd} \quad (6)$$

$$n_5 = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{2}{\pi}} I_o^2 \mu^5 \exp\left(-\frac{1}{2\mu^2}\right) \quad (7)$$

Nas Equações (3) a (7), o termo  $\langle t \rangle$  é a corrente rms efetiva de ruído do receptor ( $A/\sqrt{Hz}$ ),  $B$  é a largura de banda de um canal (Hz),  $q$  é a carga eletrônica ( $1,6 \times 10^{-19}$  C) e  $m$  é o índice rms de modulação de  $N$  canais. Assumindo que cada canal possua o mesmo OMI  $m_o$ ,  $m$ (adimensional) será dado por [1]

$$\mu = \sqrt{\frac{N m_o^2}{2}} \quad (8)$$

onde  $P_{3rd}$  é a potência de cada termo de intermodulação de terceira ordem, determinada por [1]

$$P_{3rd} = 0,5I_0^2 a_3 m_o^6 \quad (9)$$

O termo  $v_c$  refere-se ao canal central sobre o qual recairá o maior número de termos de intermodulação de terceira ordem ( $v_c = 0,375 (N^2 - 2N + 1)$ ), enquanto  $a_3$  é o índice de não-linearidade do laser.

O índice de modulação elétrica  $m_e$  (adimensional), é relacionado ao OMI por [1]

$$m_e = m_o \left( \frac{I_{dc} - I_{th}}{I_{dc}} \right) \quad (10)$$

onde a corrente de polarização DC  $I_{dc}$  (em Amperes) é dada por

$$I_{dc} = \frac{I_{max} + I_{th}}{2} \quad (11)$$

O termo  $I_{max}$  é a máxima corrente aplicável ao laser antes do mesmo entrar na região de saturação e na região não-linear, e o termo  $I_{th}$  é a corrente de limiar do diodo laser.

#### A. Cobertura da microcélula em relação ao enlace óptico

O raio de cobertura de uma microcélula será afetado pela capacidade e limitações do enlace óptico utilizando tecnologia WDM. O nível de sinal recebido (após a equalização) na entrada do diodo laser deve garantir um mínimo OMI. A condição que o sinal recebido, após a amplificação, garanta uma CNR mínima é dada por [1]

$$GP_r = Z_{in} \frac{m_e^2 I_{dc}^2}{2} \quad (12)$$

onde  $G$  é o ganho do amplificador de rádio-frequência (RF) (adimensional),  $P_r$  é a potência do sinal recebido na antena da ERBP (em watts) e  $Z_{in}$  é a impedância entrada do laser.

### III. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

#### A. Modelo de Tonguz-Jung

O modelo apresentado por Tonguz-Jung [1] relaciona a potência transmitida pela estação móvel e a potência recebida pela ERBP por [1]

$$P_r = SP_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^\gamma \quad (13)$$

onde  $P_r$  é a potência recebida na ERBP (em watts),  $P_t$  é a potência transmitida (em watts) pela estação móvel,  $S$  é o parâmetro representativo do efeito de sombreamento, o qual irá ter o valor de 1 para uma propagação em linha de visada e cerca de -30 dB para propagação em ambientes com obstrução,  $l$  é o comprimento de onda (em metros) do sinal transmitido e  $R$  é a distância (em metros) entre a estação móvel e a ERBP. O fator de propagação  $\gamma$  (adimensional) é assumido com um valor igual a 2 para o caso de linha de visada.

A determinação do raio de cobertura de uma microcélula do sistema em análise é feita através da Equação (13) conhecendo-se a atenuação (relação  $P_r/P_t$ ) do sistema. Através da Equação (12), a potência recebida ( $P_r$ ) é associada a parâmetros do sistema do sistema óptico ( $m_o$ , CNR,  $N$ , etc.). Desta forma, raio da célula ( $R_{50}$ ) no qual as estações móveis irão garantir uma CNR mínima com um OMI mínimo é dado, em metros, por [1]

$$R_{50} = \sqrt{\frac{SGP_t}{8Z_{in}}} \frac{\lambda}{\pi(I_{dc} - I_{th})m_o} \quad (14)$$

A potência do sinal nesta distância é a média da intensidade do campo recebido com uma distribuição gaussiana [1]. A confiabilidade de 90% ( $R_{90}$ ) na cobertura da célula é aceita como uma meta de serviço nos sistemas celulares e pode ser relacionada a  $R_{50}$  por [1]

$$R_{90} = R_{50} 10^{\frac{-0.13\sigma}{\gamma}} \quad (15)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão em dB para o sinal medido.

#### B. Modelo de Okumura-Hata

As equações matemáticas desenvolvidas por Hata, a partir das observações e gráficos desenvolvidos por Okumura, e suas faixas de aplicação utilizadas neste trabalho são mostradas a seguir [2]:

$$L_p \text{ (dB)} = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_B + a_m(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log R \quad (16)$$

onde  $a(h_m)$  é o fator de correção da altura da antena móvel, dado em dB por [2]

$$a_m(h_m) = 4.97 - 3.2(\log 11.75 h_m)^2 \quad (17)$$

para  $f \geq 400$  MHz.

Nas Equações (16) e (17),  $f$  é a frequência de operação em MHz (100-1500),  $h_B$  é a altura da antena da estação rádio base em metros (30-200),  $h_m$  é a altura da antena do terminal móvel em metros (1-10) e  $R$  é a distância entre transmissor e receptor em Km (1-20). Os valores entre parênteses representam a faixa de validade para o modelo de Okumura-Hata.

O raio da microcélula do sistema em análise será determinado em função de parâmetros do sistema óptico e do modelo de Okumura-Hata. Utilizando-se as Equações (16) e (17) juntamente com as Equações (1) e (12), pode-se chegar ao valor do raio dado por [3]

$$R_{50} = 10^{\frac{T}{44.9 - 6.55 \log h_B}} \quad (18)$$

sendo

$$T = 10 \log[2GP_t] - 10 \log[Z_{in} m_o^2 (I_{dc} - I_{th})^2] - 69.55 - 26.16 \log f + 13.82 \log h_B - a(h_m) \quad (19)$$

Assumindo que a potência do sinal recebido neste raio ( $R_{50}$ ) seja a média de uma distribuição gaussiana e que 90% de confiabilidade ( $R_{90}$ ) seja um parâmetro para os sistemas móveis, pode-se chegar a uma relação entre  $R_{50}$  e  $R_{90}$  dada por [3]

$$R_{90} = R_{50} \times 10^{\frac{1.3\sigma}{44.9 - 6.55 \log h_B}} \quad (20)$$

#### C. Modelo de Maciel-Bertoni-Xia

Tratando a estação rádio base como a fonte e a móvel como o receptor, a atenuação do percurso, em dB, pode ser escrita como a soma da perda do espaço livre  $L_0$  com a perda  $L_{ex}$ . A perda no espaço livre, em dB, é dada por [4]:

$$L_0 = -10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right] \quad (21)$$

onde  $l$  é comprimento de onda em metros e  $R$  é a distância entre a antena rádio base e antena móvel em metros.

A perda  $L_{ex}$  pode ser escrita como a soma de duas partes,  $L_{ex} = L_{e1} + L_{e2}$ , associadas respectivamente a :

1) A difração dos campos ao nível do prédio imediatamente antes da antena móvel;

2) A redução do campo ao nível do prédio imediatamente antes da antena móvel, como resultado da propagação ocorrida nas fileiras dos prédios anteriores.

A perda  $L_{e1}$ , em dB, é dada por [4]:

$$L_{e1} = -10 \log \left[ \frac{G_1(\theta)}{\pi \kappa r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right], \quad (22)$$

onde  $\kappa = 2\pi/\lambda$ ,  $G_1(\mathbf{q})$  é o ganho da antena móvel da direção  $\mathbf{q}$  dada por [4]

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{h_p - h_m}{x} \right) \quad (23)$$

e [4]

$$r = \sqrt{(h_p - h_m)^2 + x^2} \quad (24)$$

sendo  $h_p$  é a altura média dos prédios em metros,  $h_m$  é a altura da antena móvel em metros e  $x$  é a distância horizontal entre a antena móvel e a parede do prédio difratante.

A perda  $L_{e2}$ , em dB, é expressa por [4]

$$L_{e2} = -10 \log(G_2 Q^2) \quad (25)$$

sendo  $G_2$  é o ganho na direção do prédio mais alto visível pela antena da estação base quando esta se encontra abaixo do nível do prédios.

Uma expressão para  $Q$  pode ser encontrada quando a antena da estação base encontra-se suficientemente abaixo do nível dos prédios. A amplitude da fonte equivalente depende da amplitude da onda cilíndrica incidente e do coeficiente de difração para o ângulo  $\varphi = -\tan^{-1}[(h_B - h_p)/d]$ . Esta aproximação leva a expressão [4]

$$Q = \left( \frac{d}{R-d} \right) \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\kappa\rho}} \left( \frac{1}{\varphi} - \frac{1}{2\pi + \varphi} \right) \right] \quad (26)$$

onde [4]

$$\rho = \sqrt{(h_B - h_p)^2 + d^2} \quad (27)$$

Não é possível encontrar uma solução analítica para o valor do raio da microcélula, de acordo com as Equações (1), (21), (22), e (25). Sendo assim, faz-se necessária a solução numérica de uma equação transcendental através do programa Mathematica para o cálculo do raio da microcélula com uma confiabilidade de 90 %.

#### D. Modelo de Cost 231 Walfisch-Ikegami

O modelo Cost 231 Walfisch-Ikegami possui três componentes básicos [5]:

- perda no espaço livre ( $L_0$ );
- perda por difração ao nível das ruas e por espalhamento ( $L_{rts}$ );
- perda devido aos multiplanos ( $L_{ms}$ ).

A atenuação total ( $L_T$ ) pode então ser expressa como [5]

$$L_T = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{ms} \\ L_0 \quad \text{para } L_{rts} + L_{ms} \leq 0 \end{cases}, \quad (28)$$

sendo [5]

$$L_0 = 32,4 + 20 \log R + 20 \log f, \quad (29)$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_m + L_s \quad (30)$$

e

$$L_{ms} = L_{bsh} + k_a + k_d \log R + k_f \log f - 9 \log d \quad (31)$$

Sendo  $R$  a distância entre a estação rádio base e a estação móvel em Km,  $f$  é a frequência de operação em MHz,  $w$  é largura da rua em metros,  $\Delta h_m$  é a diferença entre a altura dos prédios ( $h_p$ ) e a altura da estação móvel ( $h_m$ ) em metros,  $L_s$  é o fator de correção devido a orientação da rua em função do ângulo de incidência  $\mathbf{q}$  dado por [5]

$$L_s = \begin{cases} -10 + 0,354\theta & \text{para } 0^\circ \leq \theta < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\theta - 35) & \text{para } 35^\circ \leq \theta < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\theta - 55) & \text{para } 55^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (32)$$

Utilizando

$$\Delta h_B = h_B - h_p \quad (33)$$

os demais termos da Equação (31) podem ser definidos por [5]

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_B) & \text{para } h_B > h_p \\ 0 & \text{para } h_B \leq h_p \end{cases} \quad (34)$$

e [5]

$$\kappa_a = \begin{cases} 54 & \text{para } h_B > h_p \\ 54 - 0,8\Delta h_B & \text{para } R \geq 0,5 \text{ Km e } h_B \leq h_p \\ 54 - 0,8\Delta h_B \frac{R}{0,5} & \text{para } R < 0,5 \text{ Km e } h_B \leq h_p \end{cases} \quad (35)$$

Os termos  $k_d$  e  $k_f$  na Equação (31) estão relacionados com a atenuação da difração sobre os múltiplos semiplanos considerados no modelo como função da distância e da frequência de operação, respectivamente, e são definidos por [5]

$$\kappa_d = \begin{cases} 18 & \text{para } h_B > h_p \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_B}{h_p} & \text{para } h_B \leq h_p \end{cases} \quad (36)$$

e [5]

$$\kappa_f = -4 + \begin{cases} 0,7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para cidades de porte médio} \\ 1,5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (37)$$

Semelhante ao realizado na análise do modelo de Maciel-Bertoni-Xia [4], não será possível expressar de uma forma analítica o raio da microcélula para o modelo de Cost 231 Walfisch-Ikegami [5], em virtude das Equações (1), (29), (30) e (31). Neste caso, usa-se o *Mathematica* como ferramenta computacional para resolução das equações transcendentais encontradas.

## IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nas simulações realizadas, os valores mostrados na Tabela I são considerados padrões.

$\alpha$	Atenuação na fibra óptica	0,24 dB/Km
L	Comprimento da fibra óptica	10 Km
C	Atenuação em cada acoplador	4 dB
$I_{dc}$	Corrente DC de polarização do laser	40 mA
$I_{th}$	Corrente de limiar do laser	20 mA
$\rho$	Responsividade do fotodetector	0,85 (A/W)
RIN	Ruído de intensidade relativa do laser	-152 dB/Hz
$Z_{in}$	Impedância de entrada do laser	50 $\Omega$
$a_3$	Índice de não linearidade do laser	0,1
$P_o$	Potência óptica do laser acoplada a fibra	1 mW
$h_p$	Altura média dos prédios	30 m
$h_{B1}$	Altura da ERBP acima do nível do topo dos prédios	40 m
$h_{B2}$	Altura da ERBP abaixo do nível do topo dos prédios	20 m
$h_m$	Altura da estação móvel	2 m
d	Distância entre prédios	20 m
w	Largura das ruas	18 m
x	Distância horizontal entre a estação móvel e o prédio difratante	10 m
f	Frequência	1800 MHz
$G_1$	Ganho da antena estação móvel	0 dBi
$G_2$	Ganho da antena da estação base	0 dBi
$\sigma$	Desvio padrão da potência média recebida	5 dB
B	Largura de banda do canal	270 KHz
N	Número de canais	50
$P_t$	Potência de transmissão da estação móvel	28 dBm

Tabela I – Valores padrão para as análises

#### A. Análise do enlace óptico

A análise do enlace óptico é demonstrada através das Figuras 2 e 3. A Figura 2 mostra o comportamento da CNR em relação a variação do OMI considerando diferentes comprimentos de fibra óptica (L) e número de canais (N). Percebe-se que há um valor ótimo para o OMI com relação a distância do enlace, de tal forma que a CNR começa a decair abruptamente após tal valor, comprometendo assim o desempenho do sistema.

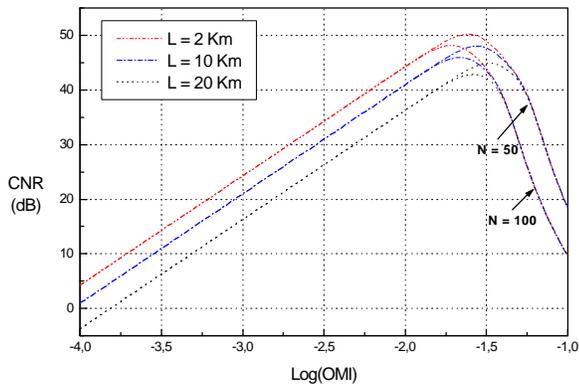


Figura 2 – Comportamento da CNR em relação ao OMI para comprimentos de fibra (L) iguais a 2, 10 e 20 Km e números de canais iguais a 50 e 100

A Figura 3 mostra a variação da CNR com o OMI para valores de  $L = 10$  Km e  $N = 50$ , variando-se os ruídos de intensidade relativa (RIN) e do índice de não-linearidade. Através das Figuras 2 e 3 percebe-se que há um valor ótimo do OMI que maximiza a CNR. A partir deste ponto, a CNR começa a degradar-se devido aos efeitos dos ruídos de intermodulação e de saturação.

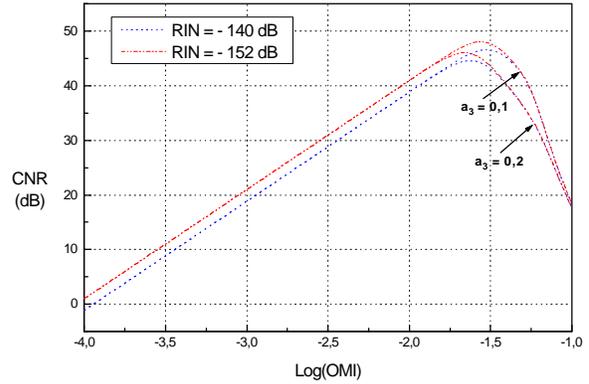


Figura 3 – Comportamento da CNR em relação ao OMI para  $a_3$  iguais a 0,1 e 0,2 e RIN iguais -140 dB e -152 dB

#### B. Cobertura da ERBP com o modelo de Tonguz-Jung [1]

A Figura 4 apresenta o raio da microcélula para uma confiabilidade de 90 % frente a uma CNR para diversos ganhos do amplificador de RF.

Através da Figura 4, percebe-se que o valor ótimo do OMI que maximiza a CNR obtido nas Figuras 2 e 3 implica em raios de microcélula na ordem de 300 m utilizando-se amplificadores com ganhos maiores que 40 dB. Neste caso, o aumento do raio da microcélula faz com que a CNR do sistema comece a diminuir, o que pode acarretar em uma degradação acentuada do sinal óptico. Os resultados obtidos mostram-se coerentes com os encontrados por Tonguz-Jung [1].

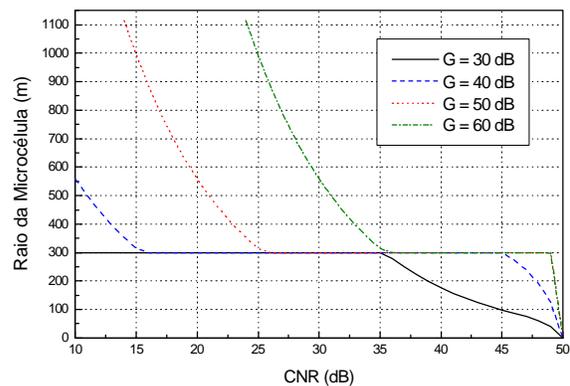


Figura 4 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando diferentes valores de G para o amplificador de RF, utilizando o modelo de Tonguz-Jung [1]

#### C. Cobertura da ERBP com o modelo de Okumura-Hata[2]

A Figura 5 mostra o comportamento do raio da microcélula frente a CNR para diversos valores de ganho do

amplificador de RF. Nota-se que por este modelo, a utilização de um OMI que maximize o a CNR como mostrado nas Figuras 2 e 3 implica em microcélulas com raios reduzidos, tornando-as inviáveis economicamente e muito sensíveis a interferência co-canal, mesmo utilizando amplificadores de alto ganho. Neste caso, seria necessário sacrificar a CNR para a obtenção de raios de microcélulas maiores.

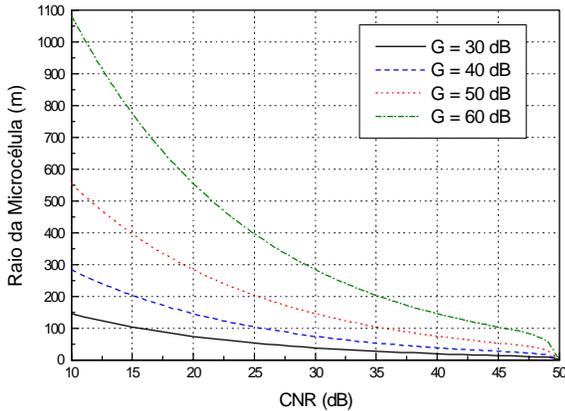


Figura 5 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando diferentes valores de G do amplificador de RF, utilizando o modelo de Okumura-Hata [2]

**D. Cobertura da ERBP com o modelo de Maciel-Bertoni-Xia[4]**

A Figura 6 mostra a análise do modelo de Maciel-Bertoni-Xia [4] para a antena da rádio base passiva com uma altura de 20 m, ou seja, abaixo do nível do topo dos prédios adjacentes. A Figura 6 mostra a variação do raio da microcélula com CNR para diferentes valores G do amplificador de RF. O modelamento de Maciel-Bertoni-Xia [4] mostra-se rigoroso na predição do raio de microcélula tanto para antenas acima do nível do topo do prédios adjacentes quanto para antenas abaixo. Desta forma, é necessário o sacrifício do OMI e da CNR para o alcance de raios de microcélula maiores.

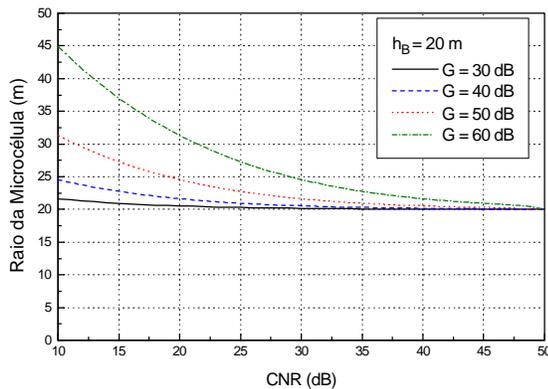


Figura 6 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando diferentes valores de G do amplificador de RF, utilizando o modelo de Maciel-Bertoni-Xia [4]

A Figura 7 mostra o comportamento do raio da microcélula para diferentes valores de altura da antena da ERBP

frente a CNR, considerando-se um amplificador de RF com um ganho de 60 dB. Nota-se utilizando-se o modelo de Maciel-Bertoni-Xia [4], a utilização de antenas mais elevadas não implica em um aumento significativo do raio da microcélula, principalmente quando se utiliza CNR de maiores valores.

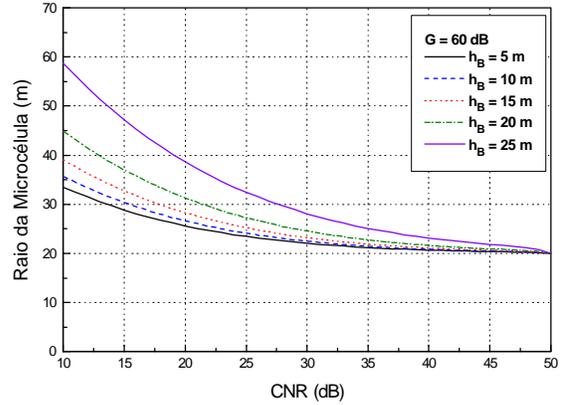


Figura 7 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando diferentes alturas da antena da ERBP, utilizando o modelo de Maciel-Bertoni-Xia [4]

**E. Cobertura da ERBP com o modelo de Cost 231 Walfisch-Ikegami[5]**

A análise mostrada na Figura 8 consideram que a antena ERBP está com uma altura de 20 m, ou seja, abaixo do nível do topo dos prédios adjacentes. A Figura 8 mostra a variação do raio da microcélula em relação CNR para diferentes valores de ganho do amplificador de RF. Nesta situação, a antena da ERBP abaixo do nível do topo dos prédios faz com que seja mais difícil alcançar os valores ótimos de OMI e CNR com raios de microcélulas viáveis, pois mesmo a utilização de amplificadores com ganhos maiores não resulta em microcélulas maiores.

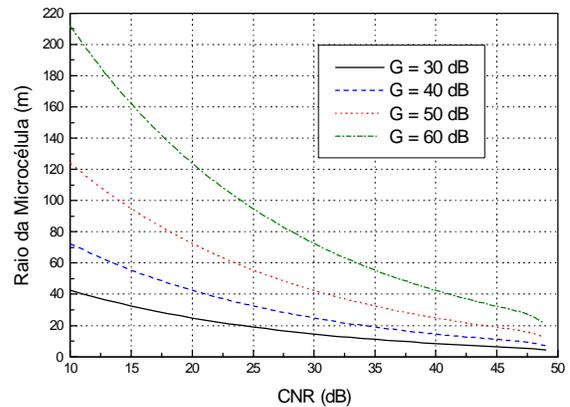


Figura 8 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando diferentes valores de G do amplificador de RF, utilizando o modelo de Cost 231 Walfisch-Ikegami [5]

A Figura 9 mostra a variação do raio da microcélula para diversos valores de altura da ERBP frente a CNR, considerando-se um amplificador de RF de ganho igual a 60 dB.

Nesta situação, nota-se que o uso de uma CNR mais alta faz com que o aumento da altura da ERBP tenha um efeito mínimo na obtenção de um raio de microcélula maior.

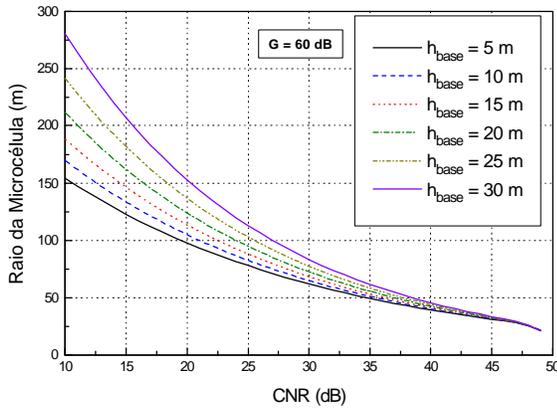


Figura 9 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando diferentes alturas da ERBP, utilizando o modelo de Cost 231 Walfisch-Ikegami [5]

#### F. Comparação entre os modelos de propagação estudados

A Figura 10 consideram que antena da ERBP está a uma altura de 20 m, ou seja, abaixo do nível do topo dos prédios adjacentes, para um ganho de 60 dB para o amplificador de RF.

A Figura 10 mostra a variação do raio da microcélula com a CNR, utilizando um amplificador de RF de 60 dB. O modelo de Tonguz-Jung [1] confirma que é otimista na predição do raio da microcélula, possivelmente devido ao fato de considerar tão somente dois casos: transmissão em linha de visada e transmissão com obstáculos, onde o sinal transmitido sofre uma atenuação de cerca de 30 dB [1]. Os modelos de Maciel-Bertoni-Xia [4] e Cost 231 Walfisch-Ikegami [5] predizem valores aproximados em virtude de considerarem parâmetros tais como difração e propagação no topo dos prédios, o que os torna mais adequados para ambientes urbanos com microcélulas. O modelo de Okumura-Hata [2] pode ser utilizado como referência, pois torna-se um meio termo entre os modelos estudados.

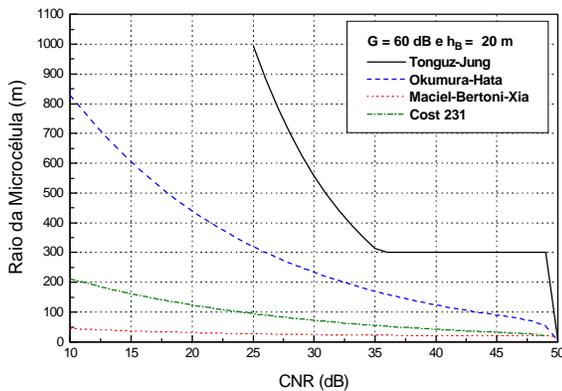


Figura 10 – Variação do raio da microcélula com a CNR considerando 4 modelos de propagação, para um amplificador de RF de 60 dB e altura da ERBP de 20 m

## V. CONCLUSÃO

Neste artigo foi simulado um ambiente de microcélulas interligadas por enlaces ópticos, utilizando-se 4 modelos de propagação em ambientes urbanos: Tonguz-Jung, Okumura-Hata e Maciel-Bertoni-Xia e Cost 231 Walfisch-Ikegami.

O enlace com fibras ópticas possui um valor ótimo onde se maximiza a CNR em conjunto com o OMI. Entretanto, a integração com o sistema móvel microcelular faz com que não seja possível a utilização neste ponto ótimo, uma vez que o raio de microcélula obtido torna-se demasiadamente pequeno.

O modelo de Tonguz-Jung considera apenas duas situações de propagação: propagação em linha de visada direta e propagação com obstrução. Nas simulações realizadas, o modelo de Tonguz-Jung sempre “sobrevvalorizou” o raio da microcélula em comparação com os outros modelos.

O modelo de Okumura-Hata comportou-se como um meio termo entre os modelos de Tonguz-Jung e os modelos de Maciel-Bertoni-Xia e Cost 231 Walfisch-Ikegami, mostrando-se coerentes com os resultados apresentados por estes últimos.

O modelo de Maciel-Bertoni-Xia já leva em conta fatores como propagação no topo dos prédios e a difração resultante desta propagação. Devido a estas características, o seu uso para ambientes microcelulares em ambientes urbanos torna-se apropriado. Os resultados obtidos através do modelo de Maciel-Bertoni-Xia mostram-se algumas vezes bem concordantes com os resultados obtidos por Cost 231 Walfisch-Ikegami.

O modelo de Cost 231 Walfisch-Ikegami também considera fatores como propagação no topo dos prédios e efeitos de espalhamento e multiplanos. Por isso, os resultados obtidos com a análise deste modelo muitas vezes se aproximam dos obtidos pelo modelo de Maciel-Bertoni-Xia e o torna também apropriado para ambientes microcelulares urbanos.

Estão em desenvolvimento estudos sobre a utilização de novos modelos para sistemas microcelulares, em especial modelos que utilizem redes neurais. Há ainda o estudo do impacto das tecnologias como TDMA, CDMA e GSM no comportamento global do sistema.

## VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CNPq, CAPES, FINEP e UFPA.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. K. Tonguz e H. Jung. “Personal communications access networks using Subcarrier multiplexed optical links”. J. of Light. Techn., Vol. 14, no. 6, pp. 1400-1409, junho, 1996.
- [2] J. D. Parsons. “The mobile radio propagation channel”. Halsted Press, 1992.
- [3] L. V. Souza. “Sistemas microcelulares integrados por fibras ópticas”, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, maio, 2001.
- [4] L. R. Maciel, H. L. Bertoni e H. H. Xia. “Unified approach to prediction of propagation over buildings for all ranges of base station antenna height”. IEEE Trans. on Vehic. Techn., Vol. 42, no. 1, pp. 41-45, fevereiro, 1993.
- [5] K. Löw. “Comparison of urban propagation models with CW-measurements”, 42nd IEEE VT Conference, Denver, pp. 936-942, maio, 1992.