

Uma Metodologia para Análise de Interferências Visando a Alocação de Frequências no Planejamento de Sistemas Ponto-Multiponto

José Mauro P. Fortes e Raimundo Sampaio Neto

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225
Gávea, Rio de Janeiro - RJ 22453

Resumo — Este trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação de interferências visando a alocação de frequências no planejamento de sistemas Ponto-Multiponto. A metodologia proposta introduz a idéia de grupos associados às estações Nodais (ou Repetidoras), formados pela estação e por pontos de teste (terminais) distribuídos ao longo de regiões de serviço tri-dimensionais (volumes de serviço). A avaliação da qualidade de uma dada alocação de frequências é baseada na folga $\Delta_{C/I}$ de razão portadora interferência agregada associada aos grupos nodal e repetidora. Boas alocações de frequência devem conduzir a folgas positivas para as estações Nodais e Repetidoras e a percentagens razoavelmente altas de pontos de teste (terminais) com folgas positivas dentro dos volumes de serviço. Esta metodologia foi utilizada no planejamento das expansões do Serviço Ponto-Multiponto da Embratel nas regiões do Rio de Janeiro e São Paulo. Alguns dos resultados obtidos para o Rio de Janeiro são apresentados a título de exemplo.

I. INTRODUÇÃO

Uma representação esquemática de um sistema Ponto-Multiponto típico é apresentada na Figura 1. A rede de serviços considerada é constituída de estações nodais e de repetidoras, cada uma delas cobrindo uma determinada área de serviço contendo várias estações terminais. Estas estações terminais acessam a estação nodal (ou repetidora) de sua área de serviço utilizando a técnica TDMA de múltiplo-acesso. As estações nodais (ou repetidoras), por sua vez, comunicam-se com as estações terminais de suas áreas de serviço utilizando uma única portadora TDM (4.992 Mbit/s). A comunicação entre estações terminais e estações nodais (ou repetidoras) é feita utilizando-se dois conjuntos de possíveis frequências para as portadoras. Na comunicação nodal-terminal é utilizada uma frequência f , escolhida entre 10 possíveis valores f_1, f_2, \dots, f_{10} (frequências baixas). No sistema considerado, $f_1 = 1.792, 25$ MHz e o espaçamento entre as frequências é igual a 3,5 MHz. A comunicação terminal-nodal, por sua vez, é feita utilizando-se uma frequência f' escolhida entre 10 possíveis valores $f'_1, f'_2, \dots, f'_{10}$ (frequências altas). No sistema considerado, $f'_1 = 2.085, 00$ MHz e o espaçamento entre as frequências é igual a 3,5 MHz.

Na comunicação entre estação repetidora e estações terminais, a alocação de frequências é invertida, ou seja, as repetidoras transmitem utilizando uma frequência $f' \in \{f'_1, f'_2, \dots, f'_{10}\}$, enquanto a comunicação terminal-repetidora é feita utilizando-se uma frequência $f \in \{f_1, f_2, \dots, f_{10}\}$. A Figura 1 apresenta ainda as potenciais

fontes de interferência afetando cada um dos componentes do sistema, a saber,

- Interferências em estação nodal, que podem ser provenientes de terminais de outras nodais ou de estações repetidoras;
- Interferências em estação repetidora, que podem ser provenientes de terminais de outras repetidoras ou de estações nodais;
- Interferências em terminal de estação nodal, que podem ser provenientes de outras nodais ou de terminais de estações repetidoras; e
- Interferências em terminal de estação repetidora, que podem ser provenientes de outras repetidoras ou de terminais de estações nodais.

Os cálculos de enlace e procedimentos utilizados pelo software desenvolvido para a determinação dos níveis de sinal e interferências presentes nos receptores das estações nodais, repetidoras e terminais são descritos na Seção II. Na Seção III são descritas as características dos terminais e estações consideradas na expansão do serviço PMP para o Rio de Janeiro, tomada como exemplo. Nesta seção, são também apresentados e discutidos os resultados dos exercícios de planejamento realizados para a determinação da melhor alocação de frequências para a expansão considerada.

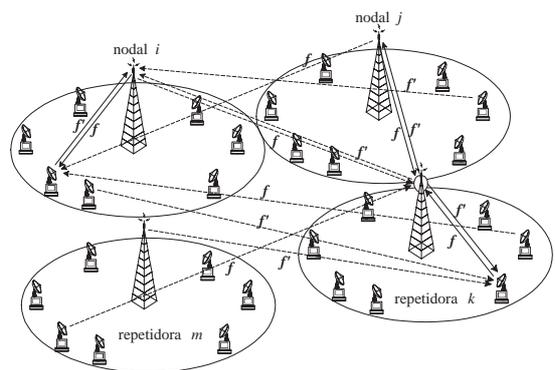


Fig. 1. Representação esquemática do sistema Ponto-Multiponto com indicação das potenciais fontes de interferência

II. CÁLCULO DE INTERFERÊNCIAS NO SERVIÇO PMP

A. Interferência Single-Entry

Nesta seção considera-se a situação de interferência única (*single-entry*) apresentada na Figura 2, onde estão ilustrados os enlaces correspondentes ao sinal desejado (percurso

de comprimento d) e ao sinal interferente (percurso de comprimento d'). Considerando a situação ilustrada nesta figura, a potência de sinal desejado, na saída do filtro de recepção, se escreve

$$C = \frac{P_T G_T(\theta) G_R(\phi)}{L_{FT} L_{FR} L_{CT} L_{CR} L_{EL} L_{DV} A_R A_T} \quad (1)$$

onde P_T representa a potência transmitida, $G_T(\theta)$ é ganho da antena transmissora numa direção que forma um ângulo θ com a direção de apontamento da antena e $G_R(\phi)$ é o ganho da antena receptora numa direção que forma um ângulo ϕ com a direção de apontamento da antena receptora. As quantidades L_{FT} e L_{CT} representam respectivamente as perdas no filtro e nos cabos de transmissão, e L_{FR} e L_{CR} representam respectivamente as perdas no filtro e nos cabos de recepção. Ainda em (1) L_{DV} corresponde à perda de potência devido ao desvanecimento no percurso do enlace, L_{EL} é a perda de espaço livre e A_R e A_T ($A_R \geq 1$ e $A_T \geq 1$) representam os valores de atenuação de atenuadores utilizados no receptor e no transmissor, respectivamente, das estações envolvidas para compensar possíveis vantagens geográficas destas estações. Por outro lado, a

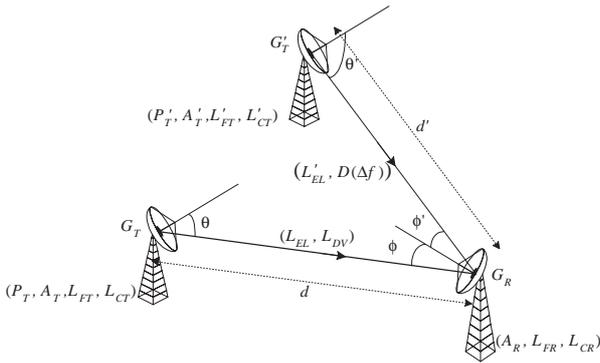


Fig. 2. Geometria correspondente às transmissões desejada e interferente (caso geral *single-entry*)

potência interferente, na saída do filtro de recepção do sinal desejado, se escreve

$$I = \frac{P'_T G'_T(\theta') G_R(\phi') D(\Delta f)}{L'_{FT} L_{FR} L'_{CT} L_{CR} L'_{EL} A_R A'_T} \quad (2)$$

onde P'_T representa a potência transmitida, $G'_T(\theta')$ é ganho da antena transmissora numa direção que forma um ângulo θ' com a direção de apontamento da antena e $G_R(\phi')$ é o ganho da antena receptora numa direção que forma um ângulo ϕ' com a direção de apontamento da antena receptora. As quantidades L'_{FT} e L'_{CT} representam respectivamente as perdas no filtro e nos cabos de transmissão, e L_{FR} e L_{CR} , do mesmo modo que em (1), representam respectivamente as perdas no filtro e nos cabos de recepção. Ainda em (2) $D(\Delta f)$ corresponde à discriminação devido à diferença entre as frequências das portadoras interferida e interferente, L'_{EL} é a perda de espaço livre e A_R e A'_T representam os valores de atenuação de atenuadores utilizados no receptor e no transmissor, respectivamente, das estações envolvidas para compensar possíveis vantagens geográficas destas estações.

Considerando-se (1) e (2), a razão portadora-interferência (*single-entry*) se escreve

$$\frac{C}{I} = \frac{P_T G_T(\theta) G_R(\phi) L'_{FT} L'_{CT} L'_{EL} A'_T}{P'_T G'_T(\theta') G_R(\phi') D(\Delta f) L_{FT} L_{CT} L_{EL} L_{DV} A_T} \quad (3)$$

Em (1), (2) e (3), a perda de espaço livre L_{EL} , expressa em dB, é dada por

$$L_{EL_{dB}} = 92,44176 + 20 \log(df) \quad (4)$$

onde d representa a distância entre as antenas transmissora e receptora em [km] e f é a frequência da portadora em [GHz].

Para efeito de planejamento, possíveis perdas L_{DV} devidas a desvanecimento serão consideradas na Seção III através de uma margem na potência requerida para um desempenho especificado. Assim, o cálculo de (1) e (3) é feito supondo-se $L_{DV} = 1$ (ausência de desvanecimento).

No caso de estações nodais (ou repetidoras), as atenuações A_T e A_R que aparecem em (1), (2) e (3) não se aplicam e portanto $A_T = A_R = 1$. No caso de estações terminais, de modo a compensar possíveis vantagens geográficas, tornando homogêneo o ambiente interferente gerado por estas estações, considera-se que a atenuação de transmissão A_T é dada por

$$A_T = \frac{v_T(r, h)}{v_T^*} \quad (5)$$

onde r é a distância, sobre a superfície da Terra, entre o terminal em consideração e a estação nodal (ou repetidora) que serve este terminal, h é a altura do terminal considerado (correspondente à altitude do terreno h_{terr} mais a altura da antena do terminal) e

$$v_T(r, h) = \frac{G_R(\theta(r, h))}{r^2 + (H - h)^2} \quad (6)$$

com $G_R(\theta(r, h))$ denotando o ganho de recepção da antena omnidirecional da estação nodal (ou repetidora) na direção do terminal em consideração. É possível mostrar que

$$\theta(r, h) = 90 - \tau - \arctan\left(\frac{r}{|H - h|}\right) \quad (7)$$

com τ e H representando, respectivamente, o *tilt* e a altura (altitude da base mais altura da torre) da antena omnidirecional.

Em (5), v_T^* corresponde ao valor mínimo de $v_T(r, h_{terr})$. Este valor mínimo corresponde a um terminal transmissor localizado na área de serviço considerada, sobre a superfície da Terra, a uma distância r^* (a ser determinada) do ponto onde está localizada a Nodal (ou Repetidora). É possível verificar que $r^* \geq r_{min}$, onde

$$r_{min} = (H - h_{terr}) \cot(\tau + \theta_c) \quad (8)$$

sendo θ_c o valor de ângulo a partir do qual o ganho da antena (omnidirecional) no plano vertical é considerado constante.

Nos casos considerados, o valor de r^* se situa em um dos extremos do intervalo $[r_{min}, r_{max}]$, onde r_{max} é o raio da área de serviço. Desta forma, o valor de v^* é determinado através de

$$v_T^* = \min(v_T(r_{min}, h_{terr}), v_T(r_{max}, h_{terr})) \quad (9)$$

Note que, com estas compensações, a menos de possíveis diferenças devido ao desvanecimento, a potência do sinal recebido por uma estação Nodal ou Repetidora passa a depender apenas das características individuais de cada terminal, não dependendo de sua posição na área de serviço.

A atenuação de recepção A_R pode ser determinada de forma análoga à que foi feita para A_T . É importante observar, entretanto, que a homogeneização do ambiente interferente, obtida pelo controle dos atenuadores de transmissão dos terminais (A_T) na forma sugerida, diminui o potencial interferente, aumentando assim a capacidade do sistema. Por outro lado, o controle dos atenuadores de recepção dos terminais não tem efeito sobre o ambiente interferente e pode não ser utilizado ($A_R = 1$).

B. Interferência Agregada

Na análise envolvendo o agregado de interferências, denominou-se *Grupo Nodal* ao conjunto formado por uma estação nodal e pelas diversas estações terminais a ela conectadas e, de maneira análoga, denominou-se *Grupo Repetidora* ao conjunto formado por uma estação repetidora e suas estações terminais.

Como o objetivo aqui é garantir requisitos adequados para a operação em presença de interferências dos receptores de cada grupo, as razões portadora-interferência são calculadas a nível de grupo considerando-se os casos mais desfavoráveis. Assim, para cada grupo considerado, são definidos dois tipos de razões portadora-interferência agregada: uma para interferências sobre a estação nodal (ou repetidora) do grupo e outra para interferências sobre terminais do grupo. Estas definições são apresentadas a seguir através das equações (10) a (16) e da Tabela I.

Interferência sobre Estação Nodal (ver Figura 3)

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{N_i}^{-1} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ j, \text{ nodal}}} \max \left[\left(\frac{I}{C}\right)_{\overline{T}_j^{(N)}, N_i}, \left(\frac{I}{C}\right)_{\Upsilon_{R,j}^{(N)}, N_i} \right] + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i \\ m, \text{ repetidora}}} \left(\frac{I}{C}\right)_{R_m, N_i} \quad (10)$$

De forma análoga, obtém-se:

Interferência sobre Terminais do Grupo Nodal

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{T_{k,i}^{(N)}}^{-1} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ j, \text{ nodal}}} \left(\frac{I}{C}\right)_{N_j, T_{k,i}^{(N)}} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i \\ m, \text{ repetidora}}} \max_{\ell} \left[\left(\frac{I}{C}\right)_{T_{\ell,m}^{(R)}, T_{k,i}^{(N)}} \right] \quad (11)$$

No caso do terminal mais afetado, tem-se

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{\underline{T}_i^{(N)}} = \min_k \left[\left(\frac{C}{I}\right)_{T_{k,i}^{(N)}} \right] \quad (12)$$

Interferência sobre Estação Repetidora

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{R_i}^{-1} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ j, \text{ nodal}}} \left(\frac{I}{C}\right)_{N_j, R_i} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i \\ m, \text{ repetidora}}} \left(\frac{I}{C}\right)_{\overline{T}_m^{(R)}, R_i} \quad (13)$$

Interferência sobre Terminais do Grupo Repetidora

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{T_{k,i}^{(R)}}^{-1} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i \\ j, \text{ nodal}}} \max \left[\left(\frac{I}{C}\right)_{\overline{T}_j^{(N)}, T_{k,i}^{(R)}}, \left(\frac{I}{C}\right)_{\Upsilon_{R,j}^{(N)}, T_{k,i}^{(R)}} \right] + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i \\ m, \text{ repetidora}}} \left(\frac{I}{C}\right)_{R_m, T_{k,i}^{(R)}} \quad (14)$$

em (14),

$$\left(\frac{I}{C}\right)_{\overline{T}_j^{(N)}, T_{k,i}^{(R)}} = \max_{\ell} \left[\left(\frac{I}{C}\right)_{T_{\ell,j}^{(N)}, T_{k,i}^{(R)}} \right] \quad (15)$$

No caso do terminal mais afetado, tem-se

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{\underline{T}_i^{(R)}} = \min_k \left[\left(\frac{C}{I}\right)_{T_{k,i}^{(R)}} \right] \quad (16)$$

TABELA I
NOTAÇÃO

Símbolo	Significado
$\left(\frac{I}{C}\right)_{A,B}$	I/C devido a interferência <i>single-entry</i> de A em B
$\left(\frac{I}{C}\right)_A$	I/C devido a interferência <i>agregada</i> em A
$\overline{T}_j^{(N)}$	Terminal mais interferente do Grupo Nodal j
$\overline{T}_j^{(R)}$	Terminal mais interferente do Grupo Repetidora j
$\underline{T}_j^{(N)}$	Terminal mais afetado do Grupo Nodal j
$\underline{T}_j^{(R)}$	Terminal mais afetado do Grupo Repetidora j
$\Upsilon_{R,j}^{(N)}$	Tx do enlace de conexão da Repetidora da Nodal j
$T_{k,i}^{(N)}$	Terminal no ponto de teste k do Grupo Nodal i
$T_{k,i}^{(R)}$	Terminal no ponto de teste k do Grupo Repetidora i
N_i	Estação Nodal do Grupo Nodal i
R_i	Estação Repetidora do Grupo Repetidora i

Nas definições apresentadas, considera-se que:

1. Para efeito de planejamento, todos os terminais têm as mesmas características. Assim, em (10) e (13), devido à compensação de possíveis vantagens geográficas, a potência C do sinal desejado recebido pela nodal (ou repetidora) é, na ausência de desvanecimento, a mesma, independentemente da posição do terminal transmissor.
2. Nas equações (11) e (14) os índices k e ℓ correspondem a pontos de teste pertencentes a conjuntos finitos de

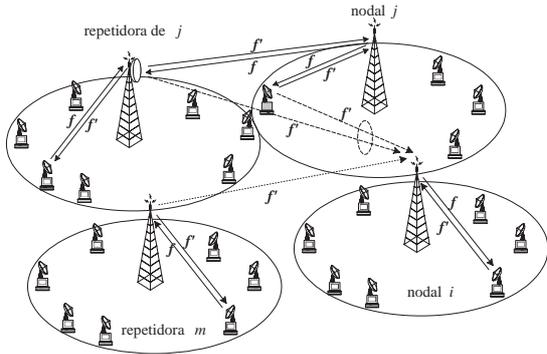


Fig. 3. Interferência em Estação Nodal

pontos de teste (localizações para os terminais) previamente escolhidos dentro das áreas de serviço dos grupos interferido e interferente, respectivamente.

3. As razões interferência-portadora de *single-entry* que aparecem em (10), (13), (11) e (14) são determinadas utilizando-se a expressão em (3).
4. Na equação (10), o terminal mais interferente de um Grupo Nodal j , $\overline{T}_j^{(N)}$, é determinado da seguinte maneira: caso o receptor interferido esteja fora da área de serviço da Nodal j , $\overline{T}_j^{(N)}$ corresponde a um terminal hipotético localizado na reta que une o transmissor da Nodal j e o receptor interferido, apontando para o receptor interferido e com a maior distância possível da Nodal j , dentro da de sua área de serviço; caso contrário, $\overline{T}_j^{(N)}$ corresponde a um terminal localizado o mais próximo possível (alguns metros) do receptor da Nodal interferida, sobre a reta que une este receptor à Nodal j e apontando para a Nodal j .
5. Na equação (13), o terminal mais interferente de um Grupo Repetidora m , $\overline{T}_m^{(R)}$, é determinado de forma análoga à descrita no item anterior, para um Grupo Nodal.

As expressões apresentadas nesta seção são utilizadas pela ferramenta de análise desenvolvida que, para uma dada configuração da rede ponto-multiponto, calcula as razões portadora-interferência agregada associadas a cada grupo (Grupo Nodal ou Grupo Repetidora).

III. EXERCÍCIOS DE PLANEJAMENTO

A metodologia apresentada nas seções anteriores foi utilizada em [1] para avaliar a situação atual e possíveis expansões das redes PMP instaladas no Rio de Janeiro e São Paulo. A avaliação dos ambientes interferentes associados a cada rede foi feita utilizando-se as expressões (10) a (14) e os procedimentos descritos nos itens 1 a 5 que apresentados no final da Seção II.

No cálculo das razões portadora-interferência em (11) e (14), os pontos de teste associados aos índices k (terminal interferido) e ℓ (terminal interferente) foram distribuídos na área de serviço de acordo com a geometria ilustrada na Figura 4. Na distribuição destes pontos de teste, $r_{max} = 10$ km, r_{min} foi calculado através de (8) e $r_{med} = \frac{1}{2}(r_{min} + r_{max})$. O valor de Δh foi tomado igual a 50 metros e o ângulo $\Delta\xi$ foi feito igual a 10 graus para os terminais interferidos (índice k), resultando em 324 pontos

de teste, e 20 graus para os terminais interferentes (índice ℓ), resultando em 162 pontos de teste. No caso de áreas de serviço cobertas por antenas setoriais, a localização dos pontos de teste foi feita utilizando-se a geometria da Figura 4, restrita à faixa angular de cobertura da antena setorial. A avaliação dos resultados dos diversos exercícios de plane-

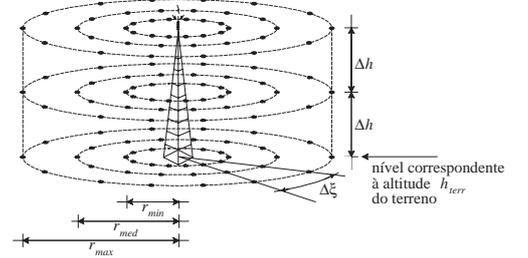


Fig. 4. Posições dos pontos de teste

jamento é baseada na folga $\Delta_{C/I}$ de razão portadora interferência agregada associada aos grupos nodal e repetidora. Esta folga é definida como a razão entre a razão portadora-interferência determinada e o valor mínimo CIR_{lim} de razão portadora-interferência que permite a operação do sistema com um desempenho especificado para operação em presença de interferências e ruído térmico. A determinação de CIR_{lim} foi feita tratando-se a interferência agregada como um ruído térmico de mesma potência na saída do filtro de recepção e considerando-se a restrição

$$\frac{C}{I_{agr} + N} \geq CNR_{lim} \quad (17)$$

onde N é o valor da potência de ruído térmico na saída do filtro de recepção e CNR_{lim} corresponde ao valor de razão portadora-ruído térmico associada ao desempenho especificado. De (17) resulta então

$$\frac{C}{I_{agr}} \geq CIR_{lim} \quad (18)$$

com

$$CIR_{lim} = (1 + N/I_{agr}) CNR_{lim} \quad (19)$$

Assim, a folga $\Delta_{C/I}$ de razão portadora-interferência agregada é dada por

$$\Delta_{C/I} = \frac{\frac{C}{I_{agr}}}{\left(1 + \frac{N}{I_{agr}}\right)} CNR_{lim} \quad (20)$$

Nos exercícios de planejamento para alocação de frequências considerou-se o requisito de que na ausência de desvanecimento o receptor deve operar com uma taxa de erro de bit (BER) $q = 10^{-7}$. Neste caso,

$$CNR_{lim_{dB}} = CNR_{[10^{-7}]_{dB}} \quad (21)$$

onde $CNR_{[q]}$ é a razão portadora ruído necessária para que, em presença de ruído térmico apenas, o receptor opere com $BER=q$ (extraída da curva de desempenho do modem). Para as melhores alocações de frequências obtidas considerou-se também as folgas $\Delta_{C/I}$ associadas ao requisito adicional de que em presença de desvanecimento o sistema deve operar com uma BER menor do que 10^{-3} durante pelo menos $p\%$ do tempo. Neste caso,

$$CNR_{lim_{dB}} = CNR_{[10^{-3}]_{dB}} + M_{[p\%]_{dB}} \quad (22)$$

onde $M_{[\cdot]}$ é uma margem que deve ser inserida na potência transmitida para compensar as possíveis perdas devidas ao desvanecimento. Considerou-se aqui que

$$M_{[p\%]_{dB}} = \max[M_{0_{dB}}, 10 \log K_1 + 36 \log d_h + 8,9 \log f - 10 \log(100 - p) - 14 \log(1 + D_h/d_h)] \quad (23)$$

onde M_0 é um valor fixo de desvanecimento (adequadamente escolhido), K_1 é o fator topográfico climático, d_h é o comprimento do enlace em [km], f é a frequência da portadora em [GHz], D_h é o módulo da diferença entre as altitudes das antenas transmissora e receptora em [m] e p é a percentagem do pior mes em que a atenuação L_{DV} por desvanecimento não ultrapassa o o valor da margem $M_{[p\%]}$. Convém ressaltar que os resultados relativos a interferências sobre terminais de nodais ou repetidoras são obtidos na forma de histogramas (% de ocorrência) dos valores de $\Delta_{C/I}$ ao longo do conjunto de pontos de teste correspondentes aos terminais interferidos (índice k). Este valores são obtidos utilizando-se (11) ou (14) no numerador de (20).

A. Exemplo de Aplicação: Rede do Rio de Janeiro

Nos estudos relativos ao Rio de Janeiro, foram considerados cenários contendo estações Nodais e Repetidoras selecionadas a partir de um grupo de estações Nodais e Repetidoras. Este grupo inclui 10 Nodais, sendo 3 na Rua Alexandre Mackenzie (N_1, N_2, N_3), 1 no Corcovado (N_4), 1 em Pedra de Guaratiba (N_5), 1 no Morro do Centenário (N_6), 1 na Igreja da Penna (N_7), 1 no Morro da Polícia (N_8), 1 no Morro do Quilombo (N_9) e 1 na Torre do Rio-Sul (N_{10}). Inclui ainda 3 Repetidoras, sendo 1 no Corcovado (R_1 - conectada a N_2) e 2 no Sumaré (R_2 conectada a N_1 e R_3 conectada a N_3). Os dados específicos de cada uma destas estações (localização, altitude, tipo de antena, altura da torre, perdas de cabo e *branching*, potência de transmissão, etc.) podem ser encontrados em [1].

A distribuição geográfica das estações consideradas e as respectivas áreas de serviço (circulares com raio de 10 km) são mostradas na Figura 5. Nos exercícios de planejamento da rede do Rio de Janeiro, a altitude do terreno h_{terr} foi tomada igual a zero para todas as as estações nodais e terminais. Além destes dados, os exercícios de planejamento consideraram, para as estações nodais e repetidoras, uma potência de ruído térmico na recepção $N_{dBm} = -106$. Nos cálculos que não consideram desvanecimento, adotou-se em (21) uma razão sinal-ruído térmico de limiar $CNR_{lim_{dB}}$ correspondente a uma taxa de erro de *bit* de 10^{-7} que, de acordo com os dados do Modem utilizado é igual a 18,3 dB. Nos cálculos que levaram em conta os efeitos do desvanecimento, adotou-se em (22) uma razão sinal-ruído térmico de limiar $CNR_{lim_{dB}}$ correspondente a uma taxa de erro de *bit* de 10^{-3} (14,0 dB para o Modem utilizado) e uma margem de desvanecimento correspondente a $p = 99,985\%$.

Com relação aos terminais, nos exercícios de planejamento, considerou-se que todos os terminais de um mesmo grupo operam com antenas parabólicas de 60 cm de diâmetro e têm as mesmas características (potência de transmissão, perdas de cabos e filtros, potência de ruído térmico, diagrama de radiação da antena, etc.). Os valores destes parâmetros podem ser encontrados em [1]. No caso

de interferências sobre terminais, de acordo com os Modems utilizados, adotou-se para o caso de ausência de desvanecimento $CNR_{lim_{dB}} = 16,3$ ($BER = 10^{-7}$). No caso que considera os efeitos do desvanecimento $CNR_{lim_{dB}} = 12,0$ ($BER = 10^{-3}$) mais a margem de desvanecimento correspondente a $p = 99,985\%$.

O enlace de conexão das estações repetidoras foi considerado como o enlace de um terminal da estação nodal mãe, operando com uma antena parabólica de 3 metros e com as demais características idênticas às de um terminal padrão. Nos cálculos de interferência, o valor de atenuação A_T foi ajustado de modo fazer com que a potência recebida pela estação nodal mãe seja, a menos do desvanecimento, igual à dos demais terminais do grupo desta estação nodal.

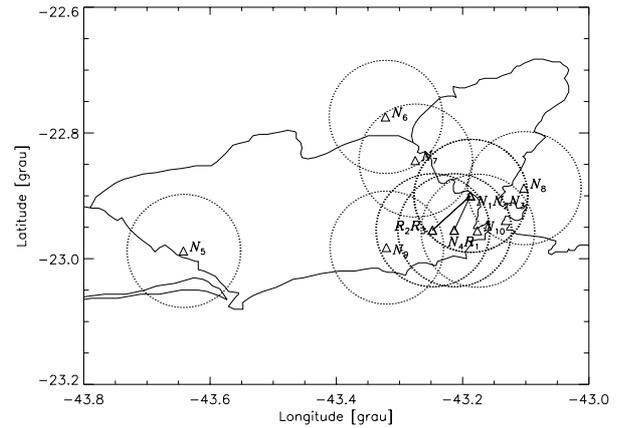


Fig. 5. Estações Nodais e Repetidoras no Rio de Janeiro: situação a ser planejada. Áreas de serviço com 10 km de raio

A.1 Rio de Janeiro: Situação Atual

A Tabela II apresenta as frequências e polarizações atribuídas atualmente às quatro estações em operação no Rio de Janeiro. Na Tabela III são apresentados os resultados obtidos para a potência recebida e interferência agregada em cada uma das quatro estações. Além dos valores de CIR_{lim} e da folga $\Delta_{C/I}$, dados por (19) e (20), respectivamente, a Tabela III apresenta também os grupos que contribuem de forma mais significativa para a interferência agregada. A Tabela IV explicita a percentagem de ocorrência de valores positivos da folga $\Delta_{C/I}$ associada aos terminais correspondentes aos pontos de teste de cada estação Nodal ou Repetidora, assim como o grupo que mais contribui para a interferência agregada no terminal mais afetado dentre estes terminais.

Com relação às estações, a Tabela III indica folgas negativas para a repetidora R_1 (provocada por interferência de terminal de R_2) e R_2 (provocada por interferência de terminal de R_1). Estes valores de folga resultam da consideração de pior caso de terminal interferente, conforme descrito no item 5 dos comentários que seguem a Figura 3. Ressalte-se, entretanto, que como as repetidoras R_1 e R_2 estão localizadas em morros altos (Corcovado e Sumaré, respectivamente), esta situação de pior caso, que requeria um terminal interferente vizinho à estação interferida, não deve ocorrer na prática. Eliminando-se estas situações muito pouco prováveis, as folgas obtidas seriam positivas.

TABELA II

ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS (RIO DE JANEIRO - SITUAÇÃO ATUAL)

Nodal	Frequência	Polarização	Nodal Mãe
N_1	f_3	vertical	-
N_2	f_7	vertical	-
Repetidora	Frequência	Polarização	Nodal Mãe
R_1	f'_2	horizontal	N_2
R_2	f'_5	horizontal	N_1

TABELA III

INTERFERÊNCIAS SOBRE ESTAÇÕES NODAIS E REPETIDORAS (RIO DE JANEIRO - SITUAÇÃO ATUAL, SEM DESVANECIMENTO, $BER=10^{-7}$)

Estação	C [dBm]	I_{agr} [dBm]	CIR_{lim} [dB]	$\Delta_{C/I}$ [dB]	Grupo mais interferente (I em [dBm])
N_1	-85.68	-129.73	42.05	2.00	R_1 (-129.76)
N_2	-80.44	-145.29	57.59	7.26	R_2 (-146.02)
R_1	-79.31	-90.08	18.41	-7.64	R_2 (-90.08)
R_2	-77.31	-94.35	18.59	-1.55	R_1 (-94.35)

Com relação à situação dos terminais (pontos de teste), os resultados obtidos apresentam valores negativos da folga $\Delta_{C/I}$. Entretanto, devido à baixa percentagem de ocorrência de folgas negativas, os resultados obtidos podem, de maneira geral, ser considerados bastante bons.

A.2 Rio de Janeiro: Progressão da Situação Atual

Neste estudo, partiu-se da situação atual da rede PMP do Rio de Janeiro, mantendo-se a alocação atual de frequências e polarizações, e procedeu-se a um aumento progressivo da rede, adicionando-de, aos poucos, grupos nodais e/ou repetidoras buscando-se, a cada passo, as melhores alocações de frequência. Dentre os vários exercícios executados, são apresentados aqui os correspondentes aos melhores resultados obtidos com um total de até 10 grupos.

A melhor alocação de frequências e polarizações encontrada para 10 grupos e os resultados correspondentes são apresentados nas tabelas V a VII.

TABELA IV

INTERFERÊNCIAS SOBRE OS TERMINAIS DE GRUPOS NODAIS OU REPETIDORAS (RIO DE JANEIRO - SITUAÇÃO ATUAL, SEM DESVANECIMENTO, $BER=10^{-7}$)

Grupo ao qual pertence o terminal mais afetado	Percentagem de ocorrências com $\Delta_{C/I} \geq 0$	Grupo mais interferente
N_1	94.4444	R_1
N_2	100.0000	R_2
R_1	95.9877	N_1
R_2	99.3827	N_1

TABELA V

ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS (RIO DE JANEIRO - 10 GRUPOS)

Nodal	Frequência	Polarização	Nodal Mãe
N_1	f_3	vertical	-
N_2	f_7	vertical	-
N_3	f_{10}	horizontal	-
N_5	f_3	vertical	-
N_6	f_9	vertical	-
N_7	f_1	vertical	-
N_9	f_1	vertical	-
Repetidora	Frequência	Polarização	Nodal Mãe
R_1	f'_2	horizontal	N_2
R_2	f'_5	horizontal	N_1
R_3	f'_8	horizontal	N_3

TABELA VI

INTERFERÊNCIAS SOBRE ESTAÇÕES NODAIS E REPETIDORAS (RIO DE JANEIRO - 10 GRUPOS, SEM DESVANECIMENTO, $BER=10^{-7}$)

Estação	C [dBm]	I_{agr} [dBm]	CIR_{lim} [dB]	$\Delta_{C/I}$ [dB]	Grupo mais interferente (I em [dBm])
N_1	-85.68	-129.71	42.03	2.00	R_1 (-129.76)
N_2	-80.44	-124.03	36.39	7.19	R_3 (-124.06)
N_3	-80.49	-131.95	44.27	7.20	R_3 (-131.99)
N_5	-76.01	-136.40	48.70	11.69	R_1 (-137.39)
N_6	-76.14	-129.85	42.16	11.54	R_3 (-129.85)
N_7	-76.92	-127.04	39.37	10.75	R_1 (-127.76)
N_9	-76.21	-124.73	37.08	11.43	R_1 (-125.25)
R_1	-79.31	-90.08	18.41	-7.64	R_2 (-90.08)
R_2	-77.31	-94.35	18.59	-1.55	R_1 (-94.35)
R_3	-77.36	-121.87	34.28	10.23	N_2 (-123.93)

Os resultados deste estudo indicam que a situação atual pode progredir até uma configuração específica envolvendo 10 grupos (7 nodais e 3 repetidoras) mantendo um padrão similar ao correspondente à situação atual. Exercícios correspondentes a situações envolvendo mais de 10 grupos, apresentaram, entretanto, folgas negativas muito acentuadas para interferências sobre pelo menos duas estações (nodais ou repetidoras).

A.3 Valores da Folga $\Delta_{C/I}$ para Desempenho em Presença de Desvanecimento

Nesta subseção são apresentados os valores obtidos para a folga $\Delta_{C/I}$ correspondentes ao requisito de que em presença de desvanecimento o sistema deve operar com uma BER menor do que 10^{-3} durante pelo menos 99,985% (pior mes). Neste caso, $\Delta_{C/I}$ é calculado utilizando-se (20) e (22). Na determinação das margens $M_{[\cdot]_{dB}}$ foi utilizada (23) com o fator topográfico climático $K_1 = 8,1 \times 10^{-6}$ e

TABELA VII

INTERFERÊNCIAS SOBRE OS TERMINAIS DE GRUPOS NODAIS OU REPETIDORAS (RIO DE JANEIRO - 10 GRUPOS, SEM DESVANECIMENTO, $BER=10^{-7}$)

Grupo ao qual pertence o terminal mais afetado	Porcentagem de ocorrências com $\Delta_{C/I} \geq 0$	Grupo mais interferente
N_1	88.8889	R_1
N_2	99.6914	R_3
N_3	100.0000	R_3
N_5	100.0000	N_1
N_6	100.0000	R_3
N_7	91.9753	N_9
N_9	92.9012	N_7
R_1	94.7531	N_1
R_2	99.3827	N_1
R_3	97.2222	N_2

a quantidade M_{0dB} dada por

$$M_{0dB} = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq d_h < 1 \text{ km} \\ 2 & ; 1 \text{ km} \leq d_h < 5 \text{ km} \\ 5 & ; d_h \geq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (24)$$

Ressalte-se que, para o caso de estações Nodais e Repetidoras, a margem utilizada em (22) corresponde ao pior caso de desvanecimento, ou seja, a um terminal localizado na fronteira da área de serviço, a uma altura $h^* \in [h_{terr}, h_{terr} + 2\Delta h]$ correspondente ao menor valor de D_h .

Os resultados apresentados nas tabelas VIII e IX dizem respeito à melhor alocação de frequências obtida com 10 grupos (ver Tabela III).

Observa-se que estes resultados apresentaram variações muito pequenas com relação àqueles obtidos na ausência de desvanecimento, apresentando um pequena diminuição das folgas $\Delta_{C/I}$ para as estações nodais ou repetidoras. Assim, para efeito de alocação de frequências, é indiferente a utilização do critério que considera uma BER de 10^{-7} na ausência de desvanecimento ou daquele que considera uma BER de 10^{-3} com desvanecimento ($p = 99,983\%$), uma vez que ambos conduzem a resultados similares.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para a avaliação de interferências visando a alocação de frequências no planejamento de sistemas Ponto-Multiponto. Diferentemente de meros cálculos de enlaces, a filosofia no planejamento de um serviço é garantir aos seus usuários, independentemente de sua localização, um determinado grau de desempenho em presença das interferências geradas pelo conjunto de todos os demais usuários do serviço. Tendo como base esta filosofia, a metodologia proposta para a análise de interferências introduz a idéia de grupos associados às estações nodais (ou Repetidoras), formados pela estação e por pontos de teste (terminais) distribuídos ao longo de regiões tri-dimensionais de serviço (volumes de serviço).

TABELA VIII

INTERFERÊNCIAS SOBRE ESTAÇÕES NODAIS E REPETIDORAS (RIO DE JANEIRO - 10 GRUPOS, DESVANECIMENTO CONSIDERADO ($p = 99,985\%$), $BER=10^{-3}$)

Estação	C [dBm]	I_{agr} [dBm]	CIR_{lim} [dB]	$\Delta_{C/I}$ [dB]	Grupo mais interferente (I em [dBm])
N_1	-85.68	-129.71	42.73	1.30	R_1 (-129.76)
N_2	-80.44	-124.03	37.09	6.49	R_3 (-124.06)
N_3	-80.49	-131.95	44.97	6.50	R_3 (-131.99)
N_5	-76.01	-136.40	49.39	11.00	R_1 (-137.39)
N_6	-76.14	-129.85	42.88	10.83	R_3 (-129.85)
N_7	-76.92	-127.04	40.08	10.04	R_1 (-127.76)
N_9	-76.21	-124.73	37.78	10.73	R_1 (-125.25)
R_1	-79.31	-90.08	19.10	-8.33	R_2 (-90.08)
R_2	-77.31	-94.35	19.23	-2.19	R_1 (-94.35)
R_3	-77.36	-121.87	34.93	9.59	N_2 (-123.93)

TABELA IX

INTERFERÊNCIAS SOBRE OS TERMINAIS DE GRUPOS NODAIS OU REPETIDORAS (RIO DE JANEIRO - 10 GRUPOS, DESVANECIMENTO CONSIDERADO ($p = 99,985\%$), $BER=10^{-3}$)

Grupo ao qual pertence o terminal mais afetado	Porcentagem de ocorrências com $\Delta_{C/I} \geq 0$	Grupo mais interferente
N_1	87.6543	R_1
N_2	99.3827	R_3
N_3	100.0000	R_3
N_5	100.0000	N_1
N_6	100.0000	R_3
N_7	92.9012	N_9
N_9	93.5185	N_7
R_1	93.5185	N_1
R_2	99.3827	N_1
R_3	98.4568	N_2

Na metodologia proposta, a avaliação da qualidade de uma dada alocação de frequências é baseada na folga $\Delta_{C/I}$ de razão portadora interferência agregada associada aos grupos nodal e repetidora. Boas alocações de frequência devem conduzir a folgas positivas para as estações Nodais e Repetidoras e a percentagens razoavelmente altas de pontos de teste (terminais) com folgas positivas dentro dos volumes de serviço. Esta metodologia foi utilizada no planejamento das expansões do Serviço Ponto-Multiponto da Embratel nas regiões do Rio de Janeiro e São Paulo. Alguns dos resultados obtidos para o Rio de Janeiro foram apresentados a título de exemplo. A metodologia proposta está atualmente sendo ampliada para considerar os efeitos do relevo do terreno e da morfologia da região nos cálculos de interferência.

REFERÊNCIAS

- [1] J. M. P. Fortes e R. Sampaio Neto, *Estudo de Planejamento do Serviço Ponto-Multiponto da Embratel*, Relatório Técnico D-ST-01/98, CETUC/PUC-Rio, Maio 1998.