

5. Método técnico para avaliação da eficiência de uso do espectro

Para o desenvolvimento do método de avaliação do uso eficiente e adequado do espectro foi realizado um agrupamento dos serviços de telecomunicações em diferentes classes, associadas a sistemas terrestres ponto-a-ponto, ponto-área e de radiodifusão. Para cada uma destas classes foi estabelecido um procedimento de cálculo da eficiência (absoluta) de uso do espectro.

5.1. Sistemas ponto-a-ponto

Nesta Seção, é detalhado o cálculo da Eficiência de Utilização do Espectro (EUE) para sistemas ponto-a-ponto e a forma de sua obtenção. O objetivo é apresentar a definição de todos os parâmetros envolvidos no cálculo da EUE destes sistemas. O detalhamento necessário é apresentado a seguir.

5.1.1. Quantidade de informação transferida

Este é um parâmetro chave na determinação da eficiência de utilização do espectro de um sistema. A consideração da quantidade de informação trafegada no sistema dá a indicação de quão ótimo está sendo o uso do espaço multidimensional (faixa de frequências, espaço geométrico e tempo) negado a outros sistemas.

Neste sentido, para os sistemas ponto-a-ponto é interessante reescrever as equações para o cálculo da eficiência de utilização [2], a fim de considerar a distância de transferência da informação, ou seja, o comprimento do enlace. Dessa forma, a negação, por exemplo de uma grande área geográfica, S , é ponderada pelo fato da informação estar sendo transmitida ao longo de uma grande extensão territorial.

Na análise da eficiência de utilização do espectro de determinado enlace específico conhecido, a distância D a ser usada no cálculo é o comprimento do enlace real. Entretanto, quando é feita análise de um sistema genérico, são utilizados valores típicos de D , de acordo com a faixa de frequências de operação.

5.1.1.1. Informação transmitida (M) em sistemas analógicos

Em sistemas analógicos, a referência para a determinação de M é o canal de VOZ.

$$M = n_c \quad (22)$$

onde: M é a quantidade de informação transmitida; e
 n_c o número de canais de voz transmitidos no enlace.

5.1.1.2. Informação transmitida (M) em sistemas digitais

Em sistemas digitais, a quantidade de informação é medida pela taxa de transmissão, em bits por segundo (bps).

Sistemas de transmissão digital de informações utilizam inúmeros dados agregados à informação útil, ou seja, à mensagem que se deseja enviar por meio do enlace. São eles, entre outros: protocolos de controle, códigos de detecção e de correção de erros e informação de gerência do sistema. Podemos denominar essas informações de sobrecarga (*overhead*) que, em conjunto com a informação útil aos usuários (a mensagem), compõem a taxa bruta de transmissão do sistema. Para que se tenha uma medida da quantidade de informação útil trafegada é proposta a introdução de um fator de sobrecarga.

$$M = T_B \cdot f_{sc} \quad (23)$$

onde: M é a informação transmitida [bps];
 T_B é a taxa bruta de transmissão do sistema [bps]; e
 f_{sc} é o fator de sobrecarga, que assume valores entre 0 e 1.

O uso do fator de sobrecarga pode ser substituído pela taxa líquida de transmissão, ou seja, a taxa de transmissão de mensagem do usuário, caso seja

conhecida. Esta será sempre a melhor opção. Como última alternativa a ser utilizada apenas nas situações em que as duas anteriores não forem possíveis, adota-se a taxa mínima exigida para a faixa de frequências de operação do equipamento.

5.1.2. Largura de faixa de frequências

A largura de faixa de frequências negada ao uso para outros sistemas corresponde ao espaço de frequências ocupado pelo transmissor cuja eficiência de utilização do espectro está sob análise.

Os sistemas ponto-a-ponto obedecem à canalização específica, regulamentada pela Anatel, para cada uma das faixas de frequências em que sua operação é permitida. As faixas de frequências de serviços ponto-a-ponto são subdivididas num conjunto de canais designados, cada qual possuindo uma largura máxima que pode ser ocupada. A largura de faixa de frequências adotada nos cálculos de EUE é aquela onde se concentra 99,5% da energia a ser transmitida pelo canal de interesse. Esta é, segundo a UIT (União Internacional de Telecomunicações), a definição da largura de faixa efetivamente ocupada por um canal de comunicação [17]. Esta definição mostra-se necessária pelo fato dos filtros utilizados nos equipamentos de comunicação não serem ideais.

Usualmente, as máscaras de filtragem dos equipamentos (gráficos de frequência vs. nível de potência do sinal), por melhor que sejam quanto à característica de emissão de frequências, indicam que os 99,5% da energia emitida pelo transmissor não estão inteiramente contidos dentro do espaço espectral reservado à emissão deste canal, ou seja, não estão dentro da faixa de frequências definida pelo regulamento que dita a canalização pertinente à faixa em questão.

Pelo exposto, para a determinação do parâmetro B, é necessário o conhecimento da máscara de filtragem do equipamento. O valor de B é, na máscara do filtro, o espaço de frequências (em Hz) onde se concentra 99,5% da energia total transmitida. Admite-se nas situações em que a informação de filtragem não estiver disponível ou mesmo por simplicidade de cálculo, que seja adotada máscara especificada pela regulamentação nacional ou pela UIT, para equipamentos nas diversas faixas de frequências de operação dos sistemas ponto-

a-ponto, ou ainda, como proposto para a aplicação neste trabalho, que seja usado exatamente o espaço espectral definido para cada canal nos regulamentos específicos das faixas de frequências.

As informações de especificação de máscara de filtragem para equipamentos operando nas diversas faixas de frequências devem ser obtidas nos manuais dos fabricantes dos equipamentos. Os documentos de referência contendo as canalizações, por faixas de frequência, podem ser obtidos no sítio da Anatel na Internet [18].

5.1.3. Tempo

Em princípio, enlaces de sistemas ponto-a-ponto são de operação contínua. Entretanto, para generalizar é mantido o parâmetro T , que pode assumir valores entre 0 e 1.

Se é conhecida a atividade do sistema ao longo do tempo, o uso do parâmetro T confere maior precisão ao cálculo da EUE. Na ausência dessa informação deve ser usado $T = 1$ (sistema ativo por todo o tempo), que se constitui na situação usual para os sistemas ponto-a-ponto.

5.1.4. Espaço geométrico

O espaço geométrico negado por um sistema à instalação de outros é a região do espaço onde é negado serviço a um transmissor e/ou receptor. Para sistemas ponto-a-ponto, tanto o espaço geográfico do transmissor como o do receptor são de interesse para cálculo. A soma de ambos se constitui no parâmetro S .

O objetivo desta seção é apresentar uma metodologia para a determinação dos espaços geométricos negados pelos equipamentos receptores e transmissores de determinado sistema que se deseja analisar quanto à eficiência de uso do espectro. Para tanto, são apresentadas as considerações sistêmicas e geométricas relevantes.

5.1.4.1. Espaço geométrico negado pelo transmissor

A instalação de transmissores de um sistema impede o uso de receptores de outro sistema em uma determinada região (região geográfica negada pelo transmissor), pelo fato de serem gerados sinais interferentes proibitivos ao funcionamento de receptores operando na mesma faixa de frequências.

Portanto, o contorno do espaço negado é dado por limiares de nível de interferências não prejudiciais. Por simplicidade de tratamento, a região negada por sistemas ponto-a-ponto será considerada como uma área (bidimensional). Devido à geometria destes sistemas, tal consideração não introduz deficiência relevante ao método, sendo tão mais válida quanto maior a faixa de frequências de operação, quando os feixes de energia propagada tendem a ser mais estreitos e direcionados, tanto no plano vertical como no horizontal.

O cálculo da área negada baseia-se na setorização da região circular centrada no transmissor sob análise. São computadas as áreas de cada setor circular e, ao final, a soma de todas elas fornece a área total negada pelo transmissor. Em princípio, toma-se por regra geral que toda a circunferência no entorno do transmissor (todos os 360°) será analisada na obtenção da área negada. Resultados práticos, certamente demonstrarão que apenas determinada abertura angular, com certa orientação (azimute) será relevante, de forma que poder-se-á considerar, em muitos casos, por exemplo, o ângulo de abertura de meia potência do diagrama de radiação horizontal da antena.

Este estudo considera que para antenas de mais alto desempenho seja considerada nos cálculos da área geográfica negada apenas a abertura de meia potência do diagrama horizontal de radiação. A metodologia apresentada é genérica, ou seja, o número de setores circulares computados, bem como a abertura angular definida para cada um deles, afetarão apenas o tempo de cálculo e precisão dos resultados.

A seguir é descrito o cálculo da área dos setores angulares.

$$A_s = \frac{\pi R^2 \theta}{360} \quad (24)$$

onde: A_s é a área de um setor circular de abertura θ [km²];

R é o raio do setor angular [km]; e

θ é a abertura angular do setor circular [graus].

Na eq. (24), o cálculo de R embute todos os parâmetros sistêmicos a serem considerados na determinação dos setores circulares. A distância R é aquela necessária para que o nível do sinal transmitido seja tal que a interferência por ele gerada possa ser desprezada, para efeitos práticos. Esta, então, será a fronteira da área geográfica negada.

A definição dada pela eq. (24) é consistente com a área geográfica considerada no cálculo do Preço Público pelo Direito do Uso de Radiofrequências (PPDUR), da Anatel [11].

A diferença entre a eq. (24) e o Regulamento da Anatel [11] é que nesta última, o raio do setor circular é definido como a distância d entre as estações envolvidas. Para o cálculo da área geométrica negada ao uso do espectro por outras estações esta definição não é conveniente, já que o efeito de interferência de uma estação excede o comprimento do enlace. Assim, o cálculo do raio do setor circular para determinação da eficiência de uso do espectro deve ser realizado como descrito a seguir.

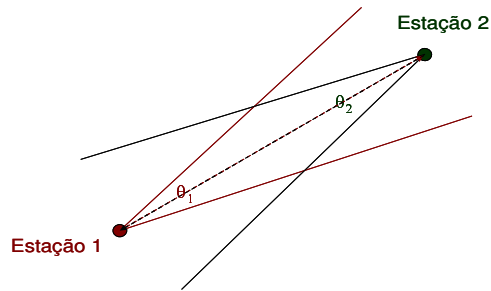
A eq. (24) fornece a área negada por um transmissor quando o receptor interferido possui antena omnidirecional ou possui antena diretiva perfeitamente alinhada com a antena do transmissor interferente. No caso do uso de antenas diretivas no receptor interferido, com azimute genérico não necessariamente direcionado ao interferente, a eq. (24) chega a resultados muito conservadores. Para considerar outras situações é necessário aplicar um fator de redução à eq. (24). Para obter este redutor, será assumido que a interferência ocorre quando o transmissor interferente está dentro do ângulo de meia potência do receptor interferido. As situações em que se considera a ocorrência ou não de interferência são ilustradas na figura 5 em que a estação 1 é a estação transmissora (interferente), a estação 2, a receptora, e θ_1 e θ_2 são os ângulos de meia potência das antenas destas estações, respectivamente.

Assumido que o azimute da estação receptora a ser instalada é uma variável aleatória com distribuição uniforme entre 0^0 e 360^0 , o redutor a ser aplicado à eq. (24) para a obtenção da área negada é igual a $(\theta_2 / 360)$, resultando na seguinte expressão:

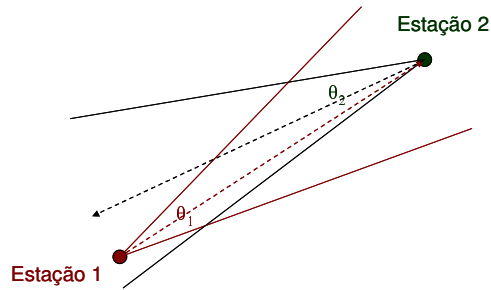
$$S = \sum_{i=1}^n A_s(\theta_i) \cdot \frac{\theta_2}{360} = \frac{\pi}{129600} \cdot \theta_1 \theta_2 \sum_{i=1}^n R_i^2 \quad (25)$$

onde: n é o número de sub-setores em que é discretizado o diagrama da estação 1; e

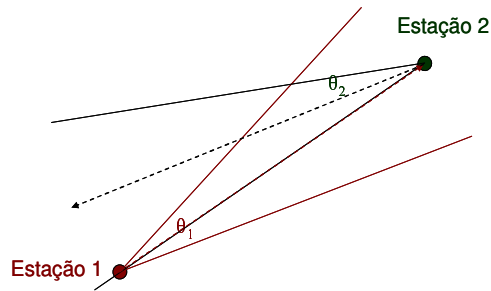
R_i é o raio do i -ésimo sub-setor.



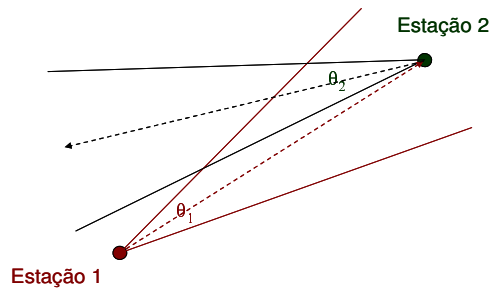
(a) Situação de interferência máxima



(b) Situação genérica de interferência



(c) Situação limite de interferência



(d) Situação de interferência desprezível

Figura 1. Situações de interferência entre estações fixas.

É necessário ainda escolher um modelo de propagação adequado à determinação da distância R. Devem ser adotados modelos de propagação recomendados pelo UIT-R de acordo com a faixa de frequências de operação de interesse. Para sistemas operando em faixas de frequências maiores que algumas dezenas de MHz, são feitas três proposições: modelo de espaço livre, modelo de Terra plana ou difração na superfície da Terra.

Se a análise do sistema é realizada já considerando-se a região de implantação do enlace, é interessante a escolha de modelo de propagação adequado: Terra plana para regiões abertas (rurais e suburbanas, de forma geral) onde a presença de reflexão especular tende a ser relevante; e espaço livre em regiões de terreno mais acidentado, povoado (com presença intensa de edificações) ou de superfície do solo rugosa. Para uma análise genérica de determinado sistema investigado quanto à sua eficiência de utilização do espectro, é opção do analista ser conservador (pessimista) na determinação da área geográfica negada, pelo uso do modelo de espaço livre, ou ser menos conservador, adotando o modelo de Terra plana e obtendo distâncias R menores.

Estas opções se aplicam quando a distância resultante é tal que o primeiro elipsóide de Fresnel está desobstruído em mais de 58% em relação à superfície da Terra [19]. Esta condição é dada por:

$$h \geq 0.58F \quad (26)$$

e

$$F_1 = 17.3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad (27)$$

onde: h é a distância vertical entre o obstáculo e a linha de visada [m];

F_1 é o raio do primeiro elipsóide de Fresnel [m];

F é a frequência de operação [GHz];

d é o comprimento do enlace [km]; e

d_1 e d_2 são as distâncias das estações à obstrução [km].

Este trabalho propõe que a análise sempre parta da situação conservadora, pelo uso do modelo de propagação em espaço livre com uma atenuação adicional por difração [20], quando ocorrer.

A expressão geral para os cálculos de potência [19] é como segue:

$$P_{TX} - L_{C_{TX}} + G_{TX} - L_{prop} + G_{RX} - L_{C_{RX}} = I_{RX} \quad (28)$$

onde: P_{TX} é a potência de transmissão [dBm];

$L_{C_{TX}}$ é a atenuação no circuito de transmissão [dB];

G_{TX} é o ganho da antena transmissora no centro do setor circular [dBi];

L_{prop} é a atenuação dada pelo modelo de propagação para a faixa de frequências de operação considerada [dB];

G_{RX} é o ganho da antena receptora na direção (azimute) do transmissor [dBi];

$L_{C_{RX}}$ é a atenuação no circuito de recepção [dB]; e

I_{RX} é o nível limiar de interferência na entrada do receptor [dBm].

A seguir é apresentada a forma de determinação de R, quando L_{prop} é dada pela expressão de propagação em espaço livre mais a atenuação adicional por difração.

$$L_{prop} = L_{el} + A_d = 32.44 + 20 \log(d) + 20 \log(f) + A_d \quad (29)$$

onde: L_{el} é a atenuação de propagação em espaço livre [dB];

A_d é a atenuação adicional por difração [dB];

d, ou R, é a distância de propagação (raio do setor circular considerado) que se deseja determinar [km]; e

f é a frequência central de operação [MHz].

Os métodos para o cálculo preciso da atenuação adicional por difração são dados na Recomendação UIT-R P.526-8 [20], que considera a difração pela curvatura da Terra, difração por obstáculos simples e difração por múltiplos obstáculos. Um método aproximado, mais simples e apropriado para este cálculo, é dado pela Recomendação UIT-R P.530-10 [19]:

$$A_d = -20h / F_1 + 10 \text{ [dB]} \quad (30)$$

onde: h é a “folga”, em metros, entre o maior obstáculo do percurso e a linha de visada (h é negativo quando a linha de visada é obstruída).

A expressão final de R é:

$$R = 10^{A/20} \quad (31)$$

onde:

$$A = eirp + G_{RX} - L_{C_{RX}} - I_{RX} - 20 \log(f) - 32.44 - A_d \quad (32)$$

e

$$eirp = P_{TX} - L_{C_{TX}} + G_{TX} \quad (33)$$

A seguir são apresentados alguns comentários relevantes a respeito de alguns dos parâmetros das equações anteriores:

G_{TX}

Se é conhecido o diagrama de radiação da antena transmissora do sistema, o ganho para determinado ângulo (central ao setor circular) é obtido diretamente do diagrama. Porém, na situação mais usual, o valor de ganho será obtido a partir de máscaras de contorno de radiação adequadas à faixa de frequências de interesse.

G_{RX}

Para efeito de determinação da distância R considera-se que na direção de cada setor circular há um receptor cuja antena aponta para o transmissor analisado dentro de um ângulo correspondente à sua largura de feixe. Neste caso, G_{RX} será aproximado pelo ganho da antena receptora.

I_{RX}

Não há uma proposta única para a determinação do valor limiar de interferência que definirá a borda da área geográfica negada. As formas propostas são:

A partir da relação C/I:

Conhecida a relação $C/I_{crítica}$ (relação portadora/interferência crítica do receptor) típica para o sistema dos receptores interferidos, considera-se que o sinal C recebido pelos receptores dos enlaces interferidos é igual à sensibilidade dos equipamentos receptores. A obtenção de I (igual a I_{RX} na eq. (28)) é imediata:

$$I - C - C / I_{crítica} \text{ [dB]} \quad (34)$$

Esta metodologia apresenta as seguintes características básicas:

- considera, de forma muito conservadora, que os sistemas interferidos não possuem margem alguma, ou seja, que o sinal recebido C é igual à sensibilidade do receptor;
- assume que toda a interferência gerada nos receptores é devida ao transmissor sob análise, como resultado direto da consideração apresentada no item anterior.

A partir da margem mínima tolerada pelos receptores:

A margem mínima tem uma relação direta com a degradação máxima permitida.

É possível estipular para as diversas faixas de frequências de interesse o valor mínimo de margem necessária ao funcionamento satisfatório e confiável de sistemas que operam em tais faixas.

Conhecido o valor mínimo de margem, chega-se à degradação máxima pelo uso da seguinte expressão:

$$D_M = M_C - M_m \quad (35)$$

- onde: D_M é a degradação máxima tolerada pelos receptores interferidos [dB];
 M_m é a margem mínima tolerada [dB]; e
 M_C é a margem calculada do sistema [dB].

No caso de um sistema genérico, para o qual não se tem o cálculo preciso da margem, o valor de M_C é a margem desejada para o sistema.

Com o objetivo de melhorar a precisão do método, é proposto que se estime o nível de degradação típico a que é submetida a margem dos sistemas implantados. Denominando esta degradação de D_s (degradação do sistema), computa-se a degradação máxima que pode ser gerada por um transmissor a ser implantado em um ambiente cujos receptores já estão sujeitos à degradação D_s .

$$D = D_M - D_s \quad (36)$$

- onde: D é a degradação máxima que pode ser gerada pelo transmissor analisado [dB];
 D_M é a degradação máxima tolerada pelos receptores interferidos [dB];

D_s é a degradação estimada, presente nos receptores antes da inserção do novo transmissor no cenário [dB].

A degradação estimada, D_s , deve ter um valor a partir da concentração de sistemas interferentes presentes no local. Um valor inicial para uso quando tal informação não está disponível é de $D_s = 3$ dB. Cumpre observar que a degradação D , dada pela eq. (36), deve ter valor maior que zero.

A partir de D é extraído o valor de interferência limite (igual a I_{RX}) introduzida pelo transmissor cuja eficiência de utilização do espectro está sendo avaliada.

$$I_{RX} = 10 \log \left[10^{(D+I_{eq})/10} - 10^{I_{eq}/10} \right] \quad (37)$$

onde: I_{RX} é a interferência limite [dBm];

D é a degradação máxima que pode ser gerada pelo transmissor analisado [dB]; e

I_{eq} é o valor de interferência de referência extraído da relação C/I do receptor interferido, fazendo-se C igual à sensibilidade do receptor [dBm].

Neste ponto, a eq. (31) pode ser calculada, obtendo-se o valor de R para o setor circular considerado. A área de cada setor é, então, calculada pela eq. (24) e a área negada pela eq. (25).

5.1.4.2. Espaço geométrico negado pelo receptor

De forma análoga ao estudo realizado sobre o espaço geométrico negado por transmissores, a instalação de receptores impede o uso de transmissores de outro sistema em uma determinada região (região geográfica negada por receptor). Isso se deve ao fato de que sinais interferentes gerados pelos novos transmissores poderiam prejudicar a sensibilidade do receptor sob análise de tal forma que este estaria tecnicamente inapto a operar.

Portanto, o contorno do espaço negado pelo receptor é dado pelos níveis permissíveis de potência radiada por transmissores do cenário. As mesmas considerações a respeito do tratamento geométrico dado ao problema para o caso

da área geográfica negada pelo transmissor são aqui aplicadas. Tais considerações levam ao uso da eq. (24) para definição da área de um setor circular negado pelo receptor.

Nesse ponto, é necessário definir a distância R . Assim como para a área geográfica negada pelo transmissor, aqui também o cálculo de R envolve a consideração de todos os parâmetros sistêmicos envolvidos. A distância R é aquela necessária para que a potência radiada por possíveis transmissores interferentes no receptor sob análise chegue a esse receptor a níveis que não o levem a uma situação de degradação proibitiva de desempenho. A expressão geral para cálculo de potências é a indicada pela eq. (38), mostrada a seguir para uma descrição dos seus fatores e adequação à situação do receptor.

$$P_{TX} - L_{CTX} + G_{TX} - L_{prop} + G_{RX} - L_{CRX} = I_{RX} \quad (38)$$

onde: P_{TX} é a potência de transmissão interferente [dBm];
 L_{CTX} é a atenuação no circuito de transmissão [dB];
 G_{TX} é o ganho da antena transmissora na direção (azimute) do receptor [dBi];
 L_{prop} é a atenuação dada pelo modelo de propagação adequado para a faixa de frequências de operação considerada [dB];
 G_{RX} é o ganho da antena receptora no centro do setor circular [dBi];
 L_{CRX} é a atenuação no circuito de recepção [dB]; e
 I_{RX} é o nível limiar de interferência permitido na entrada do receptor [dBm].

Se o modelo de propagação é o de espaço livre, o cálculo do raio R é como definido pela eq. (31).

A seguir são apresentados comentários relevantes a respeito de alguns parâmetros da eq. (38):

G_{TX}

É considerado, no cálculo da distância R , que os transmissores interferentes apontam em direção ao receptor analisado dentro de um ângulo correspondente à sua largura de feixe. Desta forma, G_{TX} será aproximado pelo ganho da antena transmissora.

G_{RX}

Se é conhecido o diagrama de radiação da antena receptora do sistema, o ganho para determinado ângulo (central ao setor circular) é obtido diretamente do diagrama. Porém, na situação mais usual, o valor de ganho será obtido a partir da máscara de contorno de radiação adequada à faixa de frequências de interesse.

I_{RX}

Da mesma forma que na avaliação da área geográfica negada por transmissor, são propostas formas de se determinar a interferência I_{RX} crítica nos receptores dos sistemas interferidos. Aqui é a interferência crítica no receptor sob análise que deve ser determinada. Entretanto, a forma de cálculo é a mesma, considerando agora os parâmetros sistêmicos do receptor cuja área negada a transmissores está sendo calculada.

A seguir, são novamente mencionadas as etapas para obtenção de I_{RX} , destacando-se as nuances de diferença entre o cálculo da interferência para a determinação da área geométrica negada por transmissor e para a área geométrica negada por receptor.

A partir da relação C/I:

Neste estudo, considera-se o valor mais restritivo de nível de sinal desejado, C, nos receptores do sistema analisado. Na situação extrema, esse nível será o próprio valor de sensibilidade. Independente do valor definido, I_{RX} é calculado conforme eq. (38).

A partir da margem mínima tolerada pelo receptor sob análise:

Embora, de forma geral, a teoria apresentada para o cálculo da área negada por transmissor se aplique ao cálculo da área negada por receptor, uma diferenciação deve ser feita na determinação da degradação. Até o cálculo da degradação máxima permitida pelo receptor, as equações a serem usadas são as mesmas.

Conhecida a degradação máxima, cada setor circular centrado no receptor analisado será responsável por uma porção dessa degradação. Nas situações práticas, setores circulares serão definidos dentro da abertura de meia potência do diagrama de radiação da antena, de forma que é proposto que a distribuição da degradação máxima pelos setores circulares seja homogênea, sem perda significativa de precisão.

A interferência é obtida com o uso da eq. (38).

A determinação da área geográfica negada por receptor é feita pelo uso da eq. (25), onde agora θ_1 é a abertura da antena receptora e θ_2 a abertura da antena transmissora.

5.2. Sistemas ponto-área

Nesta seção são apresentados os indicadores de Eficiência de Utilização do Espectro (EUE) para sistemas ponto-área e a forma de sua obtenção.

5.2.1. Cálculo da eficiência de uso do espectro para sistemas celulares

No cálculo da EUE de sistemas móveis celulares e sistemas ponto-multiponto aplicam-se diretamente as equações definidas pela UIT [2].

A área geométrica negada a outros sistemas é a área de cobertura total ou mesmo a área total de autorização considerando-se as obrigações quanto a atendimento, uma vez que as faixas de frequências são de uso exclusivo.

Analogamente, a largura de faixa negada é a largura de faixa total autorizada para cada operadora.

Idealmente, os valores de tráfego cursado, taxa real de transmissão de dados e área de cobertura devem ser fornecidos pela operadora. Esta é a única forma de avaliar com maior precisão a eficiência de uso do espectro para estes sistemas.

Caso estes dados não estejam disponíveis, algumas alternativas podem ser consideradas para estimá-las ou pode-se utilizar modelos teóricos para determinação da capacidade dos sistemas e do raio das células.

5.2.1.1. Determinação da capacidade ocupada

O tráfego de voz pode ser estimado pela quantidade de usuários da operadora numa determinada região:

$$T_T = \sum_{i=1}^{n_s} n_{u_i} \cdot \tau_{T_i} \quad (39)$$

onde: n_{u_i} é o número de usuários na i-ésima sub-região;

τ_{Ti} é a densidade de tráfego na i-ésima sub-região [Erl/usuário];
 n_s o número de sub-regiões consideradas.

Analogamente, a taxa de transmissão total utilizada pode ser calculada por:

$$R_b = \sum_{i=1}^{n_s} \frac{n_{u_i} \cdot C_i}{T} \quad (40)$$

onde: C_i é o tráfego médio de dados dos usuários na i-ésima sub-região durante o período de tempo T.

Em ambos os casos o período de tempo a ser considerado é a hora de maior movimento (HMM).

As sub-áreas podem ser setores de células, células ou regiões maiores dentro da área de autorização da operadora. O ideal é a utilização de setores ou células para obter maior precisão nos cálculos, mas estes dados podem não estar disponíveis.

Quanto à densidade de tráfego, se não houver dados disponíveis, a solução pode ser a utilização de valores típicos empregados em ante-projetos de sistemas celulares, normalmente 25 ou 30 mErl por usuário. Não se dispõe, no momento, de valores típicos para C_i , devendo este dado ser obtido das operadoras. Entretanto, como atualmente o serviço de voz é responsável por cerca de 95% do tráfego das operadoras, este dado é de menor relevância. Quando o tráfego de dados tornar-se um fator importante na utilização do sistema, esta informação deverá tornar-se conhecida.

5.2.1.2. Determinação da área de cobertura

As operadoras normalmente informam, até por questões de comercialização, a lista dos municípios em que disponibilizam serviços. A área geográfica destes municípios é uma primeira estimativa para a área de cobertura. Na prática, a cobertura só é garantida pelas operadoras na sede do município, de forma que a área real poderá ser superestimada.

Uma melhor estimativa pode ser feita utilizando-se dados reais dos transmissores, ganhos e abertura de feixe de antenas, disponíveis no SITAR

(Sistema de Informações Técnicas e Administrativas das Radiofrequências), da Anatel [18], e um modelo de propagação adequado para a faixa de frequências considerada. Neste caso, o raio teórico da célula é dado por:

$$R = 10^{\frac{L_{m\acute{a}x} - M - L_0}{10\gamma}} \quad (41)$$

onde: L_0 e γ dependem da propagação na região considerada;

$L_{m\acute{a}x}$ é a perda máxima entre transmissor e receptor, obtida do cálculo de enlace; e

M é uma margem total, incluindo a margem para efeitos de propagação, um fator de bloqueio da unidade do usuário pelo seu corpo e uma perda de propagação para o caso de recepção em ambientes fechados.

O modelo de propagação mais utilizado para sistemas operando em frequências entre 300 MHz e 1500 MHz é o modelo de Okumura-Hata [21], enquanto que nas faixas entre 1800 MHz e 2000 MHz utiliza-se uma variante deste modelo, denominada COST231-Hata [21]. Os parâmetros destes modelos são dados, para regiões urbanas, por:

$$10\gamma = 44,9 - 6,55 \log h_{ERB} \quad (42)$$

e

$$\begin{aligned} L_0 &= b + c \log f_c (\text{MHz}) - 13,83 \log h_{ERB} - 3,2(\log 11,75 h_M)^2 + 4,97 \text{ dB} \\ b &= 69,55 \quad e \quad c = 26,16 \quad \text{para } 150 \text{ MHz} \leq f_c \leq 1500 \text{ MHz} \\ b &= 46,3 \quad e \quad c = 33,9 \quad \text{para } 1500 \text{ MHz} \leq f_c \leq 2000 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (43)$$

Para regiões suburbanas e para regiões rurais tem-se, respectivamente:

$$L_{0suburbana} (\text{dB}) = L_{0urbana} - 2 \left[\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \text{ dB} \quad (44)$$

e

$$L_{0rural} (\text{dB}) = L_{0urbana} - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94 \text{ dB} \quad (45)$$

Nas expressões anteriores, f_c é a frequência de operação, h_{ERB} é a altura efetiva da estação rádio base e h_M é a altura da estação móvel.

A perda máxima de propagação é dada por:

$$L_{m\acute{a}x}(dB) = eirp(dBm) - P_{R_{limiar}}(dBm) + G_R(dBi) - L_R \quad dB \quad (46)$$

O cálculo deve ser realizado para ambos os enlaces (estação rádio base para equipamento do usuário e vice-versa) e tomada a menor das duas perdas máximas obtidas. Existem valores típicos de limiar de recepção e margens para as diversas tecnologias empregadas nos sistemas celulares. Para o cálculo da e.i.r.p. podem ser utilizados também valores típicos, o valor máximo estabelecido nas condições de uso da faixa de frequências ou o valor constante da licença para funcionamento da estação.

5.2.1.3.

Estimativa da EUE para sistemas celulares FDMA e TDMA

Em sistemas celulares que utilizam técnicas de acesso TDMA/FDMA, a capacidade é determinada pelo número total de canais disponíveis, associado à largura de faixa destinada ao serviço e à tecnologia utilizada, e pelo fator de reuso utilizado na implementação.

O fator de reuso é o número de células por grupo (*cluster*) que utilizam a totalidade de canais do sistema. Quanto menor o fator de reuso maior o número de canais por célula e, conseqüentemente, maior a capacidade do sistema.

$$n = \frac{N_T}{N \cdot N_s} = \frac{B \cdot n_c}{W} \cdot \frac{1}{N \cdot N_s} \quad (47)$$

- onde:
- n é o número de canais por setor;
 - N_T é o número total de canais disponíveis;
 - N é o fator de reuso;
 - N_s é o número de setores por célula;
 - B é a largura de faixa destinada ao serviço;
 - W é o espaçamento entre portadoras; e
 - n_c é o número de canais por portadora.

Em aplicações de voz, a capacidade de tráfego é normalmente expressa em Erlangs, em lugar do número de canais. O tráfego em Erlangs depende do número de canais disponíveis e do grau de serviço requerido (porcentagem de chamadas

bloqueadas por falta de canal na hora de maior movimento). Pelo modelo Erlang B [21] tem-se:

$$G.O.S. \cong \frac{T_T^n e^{-T_T}}{n!} \cdot 100\% \quad (48)$$

onde: G.O.S. é o grau de serviço;
n é o número de canais; e
 T_T é o tráfego telefônico em Erlangs.

O fator de reuso é limitado superiormente pelo requisito mínimo de relação sinal-interferência do sistema (associado a uma taxa de erro máxima em sistemas digitais). Para grupos de células com simetria hexagonal [21], a relação sinal-interferência (S/I) é dada, aproximadamente, por:

$$S / I (dB) = 5 \cdot \gamma \cdot \log(3N) + 10 \cdot \log(N_s) - 7,8 \quad (49)$$

onde: γ é a constante de propagação que normalmente varia entre 2 e 5 para regiões com menor ou maior grau de urbanização [dB/km].

O valor do requisito mínimo de relação sinal-ruído é função da tecnologia empregada e será um dado de entrada do processo de cálculo. A este valor deve ser acrescentada uma margem para levar em conta a assimetria das células. Por outro lado, o uso de técnicas de redução de interferência, como salto em frequência, podem fornecer significativa melhoria na relação S/I.

A partir destas expressões, a eficiência de uso do espectro para aplicações de voz em sistemas celulares FDMA e TDMA pode ser escrito na forma:

$$EUE_{voz} = \frac{T_T}{B \cdot S} = \frac{T_T(n, G.O.S)}{B \cdot 3\sqrt{3}R^2 / (2 \cdot N_s)} \quad (50)$$

onde: R é o raio da célula; e
 T_T é obtido pela solução numérica da eq. (48), com n dado pela eq. (47).

5.2.1.4. Estimativa da EUE para sistemas celulares CDMA

Para sistemas CDMA, o cálculo da capacidade é bastante distinto do apresentado na seção anterior. O espalhamento espectral permite que estes sistemas utilizem fator de reuso igual a 1. A eficiência de uso do espectro para estes sistemas pode ser escrita na seguinte forma:

$$EUE_{voz} = \frac{T_T(M, G.O.S) \cdot n_p \cdot N_s \cdot n_{ERB}}{B \cdot S} = \frac{T_T(M, G.O.S) \cdot N_s \cdot n_{ERB}}{W \cdot S} \quad (51)$$

onde: M é o número de usuário por setor;
 n_p é o número de portadoras;
 n_{ERB} é o número de estações rádio base na área considerada; e
 W é a largura de faixa do sinal espalhado.

O número máximo de usuários por setor depende da interferência gerada na própria célula e nas células adjacentes que, por sua vez, depende não apenas do número de usuários ativos mas de sua posição (aleatória) dentro das células.

O valor máximo teórico para o número de usuários de voz por portadora, por setor, em sistemas CDMA é:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{G}{\alpha \Delta} \frac{1}{1 + \beta} + 1 \quad (52)$$

onde: $G = W/R_b$ é o ganho de processamento;
 R_b é a taxa de bits do sinal de informação;
 α é o fator de atividade de voz;
 β é o fator de interferência de outras células, e
 Δ é o requisito mínimo da relação sinal-interferência, expresso em energia de bit por densidade espectral de potência de interferência mais ruído.

Este número de usuários não pode, na prática, ser atingido, pois requer potência de transmissão infinita. A razão entre o número real de usuários e este limite superior é denominado fator de carga da célula. Os valores típicos de fator de carga situam-se entre 0,6 e 0,8.

5.2.2. Cálculo da EUE para sistemas troncalizados

Para este tipo de sistema, a EUE pode ser particularizada na forma:

$$EUE = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} = \frac{Oc}{B \cdot S} \quad (53)$$

onde: $Oc = M/T$ é definida como a ocupação espectral total na área.

A ocupação espectral corresponde à fração dos canais do sistema que é efetivamente ocupada por mensagens num dado período de monitoração. Como no caso dos sistemas celulares, é recomendável utilizar a HMM como período de monitoração.

Para o cálculo de Oc , a área total de serviço S deve ser dividida em elementos de área de tamanho escolhido de forma adequada a prover boa resolução sem tornar o tempo de cálculo desnecessariamente longo.

Para cada estação do sistema são calculadas as áreas coberta e negada considerando características sistêmicas e um modelo de propagação adequado à faixa de frequências.

Um elemento de área é considerado ocupado quando as regiões cobertas ou negadas por qualquer das estações do sistema ocupam mais de 10% da área do elemento. Este valor é arbitrário, tendo sido empregado pela administração canadense [12].

Para um sistema com n estações cobrindo m elementos de área, a ocupação é dada por:

$$Oc = \sum_{i=1}^m F_{n,i} \quad (54)$$

onde: $F_{n,i}$ é a fração do tempo em que o i -ésimo elemento de área é ocupado por uma ou mais das n estações transmissoras.

Para estimativa dos raios de cobertura das estações, pode ser utilizado o modelo de propagação dado pela Recomendação UIT-R P.1546-1 [22]. Os dados necessários para este cálculo são:

- e.i.r.p. das estações transmissoras;
- ganhos e aberturas das antenas receptoras;
- sensibilidade dos receptores;
- características de filtros de recepção; e
- alturas de antena de estações rádio base e estações móveis.

Os dados necessários para determinação dos tempos de ocupação são os mais difíceis de se obter. No caso canadense [12], foram obtidos do banco de dados do *Canadian Assignment and Licensing System*. Para aplicação do método no Brasil será necessário obter os dados dos operadores ou do sítio da Anatel na Internet.

5.2.3. Sistemas ponto-multiponto

Do ponto de vista do cálculo da eficiência técnica de uso do espectro, os sistemas ponto-multiponto podem ser considerados um híbrido entre os sistemas ponto-área e os sistemas ponto-a-ponto. Olhados pelo lado da estação rádio base (ERB) são essencialmente sistemas fixos ponto-área. Olhados pelo lado dos terminais de usuário (TU) são múltiplos sistemas fixos ponto-a-ponto. Isto implica em algumas especificidades no cálculo da EUE para sistemas ponto-multiponto, como descrito a seguir.

5.2.3.1. Definição da EUE para sistemas ponto-multiponto

No caso de sistemas ponto-a-ponto foram adotadas definições para a EUE que incluem a distância sobre a qual a informação é transmitida, baseadas na eq. (15). Já para o caso dos sistemas ponto-área, foram estabelecidas definições com base na eq. (16). Dada a necessidade de adotar uma definição única para sistemas ponto-multiponto e considerando que são sistemas de acesso e não de transporte, devem ser adotadas as definições derivadas da eq. (16), tanto para a quantidade de informação transferida no enlace da estação rádio base para o terminal do usuário

quanto para a quantidade de informação transferida no enlace do terminal do usuário para a estação rádio base.

5.2.3.2. Cálculo da área geométrica negada

Para o cálculo da área geométrica negada pelas estações rádio base aplica-se o método apresentado para os sistemas ponto-área, enquanto que para o cálculo da área geométrica negada pelas estações terminais de usuários aplicam-se os métodos apresentados para os sistemas ponto-a-ponto.

5.3. Sistemas de radiodifusão

Para os sistemas de radiodifusão, o método sugerido por este trabalho para cálculo da eficiência de utilização do espectro (EUE) partiu do modelo recomendado pelo UIT-R [2], por ser um critério genérico aplicável a qualquer sistema.

$$EUE = \frac{M}{B.S.T} \quad (55)$$

- onde:
- M é a quantidade de informação;
 - B é a largura de faixa;
 - S é a área; e
 - T é o tempo.

Para obter a EUE segundo a eq. (55) foram consideradas algumas premissas, particulares aos sistemas de radiodifusão:

- devido à inexistência de informação sobre a localização dos receptores e considerando que só haverá receptores ativos na área coberta, o espaço geométrico negado leva em consideração somente o espaço do transmissor, ou seja, o espaço multidimensional (faixa de frequências, espaço geométrico e tempo) em que a presença deste transmissor impede a utilização de receptores de um novo sistema;
- conforme a tecnologia atualmente empregada nos sistemas de radiodifusão analógicos, as frequências são de uso exclusivo (numa

determinada área geográfica, são objeto de uma única concessão) e estão definidas no plano de distribuição de canais;

- os canais dos sistemas digitais de radiodifusão apesar de terem a mesma largura de faixa de frequências dos canais analógicos, tem capacidade de transportar maior quantidade de informação, ou seja, cada canal digital pode comportar mais de um canal analógico; e
- sistemas operando em frequências de ondas médias (AM) ou inferiores devem realizar redução de potência no período noturno devido às suas características específicas de propagação, sendo o tempo negado, portanto, dependente dos atributos de transmissão, e a área negada corresponderá, durante o período de redução de potência, à nova área determinada pelas novas condições de transmissão.

Com o objetivo de redefinir a EUE para sistemas de radiodifusão, além das informações mencionadas, discutiremos cada uma das variáveis de forma independente.

5.3.1. Quantidade de informação transferida (M)

A quantidade de informação transferida, M , nos sistemas de radiodifusão está intimamente ligada ao número de receptores atingidos, pois a informação efetivamente transmitida, ou seja, a ocupação do canal de radiofrequências, é igual para todas as emissoras. Assim, M será representada pela transmissão da programação propriamente dita, seja de programa de televisão ou radiofônico. No caso da radiodifusão digital deverá ser considerado, conforme mencionado anteriormente, o incremento na capacidade de transmissão, devido às técnicas digitais de modulação e compressão de dados, além de maior imunidade à interferências e possibilidade de fazer re-uso das frequências. Para representar M , consideraremos o número de canais utilizados, a tecnologia (digital ou analógica) e o número de receptores atingidos por fração do tempo de operação (transmissão) da emissora. Na transmissão digital pode-se-á, também, adicionar informação ao conteúdo de radiodifusão, como dados.

A determinação da quantidade de informação transferida poderá, também, levar em consideração critérios associados à programação. Estes critérios muitas vezes podem ser extremamente subjetivos como audiência ou qualidade da programação, comentados a seguir.

5.3.1.1. Qualidade da programação

Os aspectos relacionados à qualidade da programação são de difícil definição, pois estaríamos determinando preferências dos usuários do serviço de radiodifusão. Porém, a subjetividade deste critério pode ser diminuída quando consideramos aspectos descritos em nossa própria legislação.

O artigo 221 da Constituição Federal [23] prevê que a produção e a programação das emissoras de rádio e televisão atenderão aos seguintes princípios:

- preferência pelos fins educativos, artísticos, culturais e informativos;
- promoção da cultura nacional e regional e estímulo à produção independente que tenha como propósito sua divulgação;
- regionalização da produção cultural, artística e jornalística, conforme as porcentagens estabelecidas pela lei.

O Regulamento dos Serviços de Radiodifusão [24] determina que na licitação da concessão para os serviços de radiodifusão serão pontuados aqueles licitantes que cumprirem aspectos relacionados à programação conforme a seguir:

“...

Art. 16 – As propostas serão examinadas e julgadas em conformidade com os quesitos e critérios estabelecidos neste artigo.

§ 1º - Para a classificação das propostas, serão considerados os seguintes quesitos:

- a) tempo destinado a programas jornalísticos, educativos e informativos - máximo de quinze pontos;
- b) tempo destinado a serviço noticioso - máximo de quinze pontos;
- c) tempo destinado a programas culturais, artísticos e jornalísticos a serem produzidos e gerados na própria localidade ou no município à qual pertence a localidade objeto da outorga - máximo de trinta pontos;

...”

Ainda em relação ao Regulamento dos Serviços de Radiodifusão [24], as concessionárias devem cumprir programação mínima, incluindo-se notícias de utilidade pública, bem como considerar a ética durante as transmissões:

“...

Art. 28 – As concessionárias - permissionárias de serviços de radiodifusão, além de outros que o Governo julgue convenientes aos interesses nacionais, estão sujeitas aos seguintes preceitos e obrigações na organização da programação:

...

c) destinar um mínimo de 5% (cinco por cento) do horário de sua programação diária à transmissão de serviço noticioso;

d) limitar ao máximo de 25% (vinte e cinco por cento) do horário da sua programação diária o tempo destinado à publicidade comercial;

e) reservar 5 (cinco) horas semanais para a transmissão de programas educacionais;

...

m) irradiar, diariamente, os boletins ou avisos do serviço meteorológico;

...”

Do exposto, vimos que existe uma forma de diferenciação da programação e que podemos sugerir uma classificação de acordo com o conteúdo veiculado. Os índices para cada um dos temas relacionados ao conteúdo devem ser discutidos e definidos pela sociedade. A seguir, são apresentados alguns tipos de programas que, conforme a quantidade de tempo de veiculação, poderiam influenciar no cálculo da eficiência de um determinado sistema de radiodifusão.

- Jornalísticos, esportivos ou noticiosos;
- educativos, culturais, artísticos ou informativos;
- de entretenimento (novelas, filmes, de auditório, entre outros) ou infantis;
- de publicidade comercial;
- eleitorais, oficiais de governo (Federal, Estadual e Municipal) ou de utilidade pública, e
- meteorológicos.

O conteúdo de programação pode ainda ser diferenciado segundo a sua produção que pode ser regional, nacional ou internacional.

Assim, pode-se sugerir que a quantidade de informação, M , de acordo com a definição da EUE para sistemas de radiodifusão é:

$$M = F_{nc} \cdot F_{au} \cdot F_{qp} \quad (56)$$

onde: F_{nc} é o fator de número de canais, utilizado para demonstrar o aumento de eficiência resultante da digitalização dos sistemas;
 F_{au} é o fator de audiência que reduz a eficiência do sistema de uma quantidade proporcional à audiência de 100% (máxima possível);
 F_{qp} é o fator de qualidade de programação definido de acordo com a pontuação obtida pela emissora considerando-se que existe uma programação ideal que teria este índice igual a 100%.

Neste estudo, o fator de qualidade de programação será considerado ideal, ou seja, igual a 100% ($F_{qp} = 1$). Assim, a eq. (56) ficará da seguinte forma:

$$M = F_{nc} \cdot F_{au} \quad (57)$$

5.3.1.2. Número de canais

O fator de número de canais, mencionado na eq. (57) será representado pela quantidade de canais utilizados para a transmissão, N_c .

$$M = N_c \cdot F_{au} \quad (58)$$

Para efeito de cálculo, o número de canais não irá variar para sistemas similares. As emissoras sempre ocupam um canal para transmissão de sua programação. Esta variação ocorrerá somente quando houver utilização de sistemas digitais, pois estes podem oferecer transporte de mais de um canal digital dentro de um mesmo canal analógico.

5.3.1.3. Audiência

Existem diversos institutos de pesquisa que provêm dados sobre a audiência de programas de TV e rádio. O mais conhecido deles é o Ibope [25]. Dentre os diversos produtos relacionados à pesquisa comercializados pelo Ibope estão as informações sobre os índices de audiência de emissoras de radiodifusão.

A qualidade de utilização do espectro será maior quanto mais receptores forem atingidos. Entretanto, como a escolha da emissora é livre pelo usuário, a aplicação deste critério pode ficar prejudicada, pois a concessionária disponibiliza o seu sinal, mas é o usuário quem determina o seu aproveitamento.

A escolha da audiência para avaliação da eficiência pode ser bastante polêmica e a decisão para a sua consideração deve ser avaliada e tomada pelos organismos reguladores de radiodifusão. O sistema ideal, independentemente de sua faixa de frequências de operação, leva em consideração uma audiência de 100%, ou seja, é o sistema de maior eficiência possível. A eficiência dos demais sistemas, quando comparados com o ideal, será sempre menor que 1.

Para efeito de cálculo e aplicação à eq. (58), a audiência depende, ainda, da penetração de receptores nas residências, que será comentada a seguir.

A tabela 4 apresenta um exemplo de levantamento de índice de audiência, que pode ter periodicidade de aquisição temporal variável. Neste caso, o referido índice é obtido para a audiência de todas as emissoras de radiodifusão AM, FM e para a soma das duas, considerando-se a região do Grande Rio de Janeiro, para um universo de 8.965.486 pessoas, no período de 1º de novembro de 2003 a 31 de agosto de 2004 [25]. O índice pode ser obtido individualmente por emissora ou para um conjunto de emissoras, em faixas de frequências específicas ou para diversas faixas.

Tabela 1. Exemplo de índice de audiência

PERÍODO	TOTAL RÁDIO	TOTAL AM	TOTAL FM
	ÍNDICE DE AUDIÊNCIA (%)	ÍNDICE DE AUDIÊNCIA (%)	ÍNDICE DE AUDIÊNCIA (%)
NOV/2003 A JAN/2004	16,80	4,10	12,60
DEZ/2003 A FEV/2004	16,70	4,10	12,60
JAN/2004 A MAR/2004	16,70	4,30	12,40
FEV/2004 A ABR/2004	16,70	4,40	12,40
MAR/2004 A MAI/2004	16,50	4,50	12,10
ABR/2004 A JUN/2004	16,00	4,30	11,70
MAI/2004 A JUL/2004	16,50	4,50	12,00
JUN/2004 A AGO/2004	16,90	4,60	12,30

5.3.1.4. Densidade de receptores

A densidade de receptores será determinada de acordo com a penetração destes na região sob análise, em função da densidade populacional.

A densidade de residências na área de cobertura será obtida a partir da densidade populacional da região ou do município. Esta aproximação é necessária pois os dados referentes à densidade de residências não se encontram disponíveis. Consideraremos uma ocupação de 4 pessoas por residência. Assim, a densidade de residências na área de cobertura será:

$$\rho = \frac{\rho_p}{4} \quad (59)$$

onde: ρ_p é a densidade populacional.

A densidade populacional da área de cobertura é avaliada pela densidade do município ou dos municípios cobertos por determinada emissora. Os valores para esta variável podem ser obtidos com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [26].

Assim, o fator de audiência F_{au} , é definido por:

$$F_{au} = p.a \int \rho.dA \quad (60)$$

onde: p é a penetração de receptores do sistema;

a é a audiência da emissora; e

ρ é a densidade de residências na área de cobertura.

Levando-se em conta que a densidade populacional será uniforme dentro da área de cobertura, a partir de seu cálculo conforme a eq. (60), o fator de audiência é dado por:

$$F_{au} = p.a.\rho.A_c \quad (61)$$

onde: A_c é a área de cobertura.

Do exposto e a partir das eq. (58) e (61), obtem-se a expressão para a quantidade de informação transferida, M :

$$M = N_c.p.a.\rho.A_c \quad (62)$$

Observamos que M é determinada em função das seguintes grandezas:

- o número de canais usados pelo sistema;
- a penetração deste sistema na região;
- a audiência da emissora;
- a densidade de residências na área de cobertura; e
- a área de cobertura.

5.3.2. Área de cobertura e área negada

A determinação mais precisa para a área de cobertura e para a área negada só pode ser realizada com a utilização de *software* de planejamento e de bases de dados digitais de relevo, além de informações sobre a ocupação da região como a definição de áreas urbanas e rurais. Sem a disponibilidade desta ferramenta, a avaliação destas áreas torna-se muito complicada, sendo necessário lançar mão de aproximações. Uma delas pode ser considerar a área de cobertura como o contorno protegido e a área negada como sendo a área do município ou dos municípios cobertos pela emissora. O contorno protegido é a área onde é garantido o fornecimento do serviço conforme critérios de qualidade exigidos pela regulamentação mesmo que os receptores, devido à sua sensibilidade, consigam receber o sinal transmitido por determinada emissora a distâncias superiores às que determinam este contorno. A área negada pode ser considerada, ainda, como sendo a área do setor circular em torno das estações, conforme a eq (63).

$$A_s = \frac{\pi d^2 \theta}{360} \quad (63)$$

onde: A_s é a área de um setor circular de abertura θ ;
 d é o raio do setor angular; e
 θ é a abertura angular do setor circular.

A distância d pode ser obtida diretamente da regulamentação [18] ou por meio da aplicação do modelo de propagação constante da recomendação UIT-R P.1546-1 [22].

Os sistemas de radiodifusão, uma vez que não são conhecidas a identidade nem a quantidade de usuários e por não serem estabelecidos enlaces específicos com cada usuário, dependem da determinação de uma área de cobertura que

abranja toda a área de interesse e, conseqüentemente, todos os usuários que devem ser atendidos.

Na definição da área de cobertura deve ser observado, também, o critério subjetivo de qualidade, sendo que, neste caso, ele está relacionado com a capacidade do sistema em assegurar a qualidade do sinal na área a ser coberta, propiciando ao telespectador um serviço adequado, conforme menciona o regulamento técnico para a prestação do serviço de radiodifusão de sons e imagens e do serviço de retransmissão de televisão [27] que estabelece, entre outros, os aspectos técnicos de operação das estações transmissoras de sinais analógicos.

A área de cobertura do sistema de radiodifusão depende, também, da qualidade do sinal entregue ao usuário. A qualidade do sinal está relacionada não somente à sua intensidade e relação C/I ou taxa de erro, mas também quanto aos critérios de percepção de áudio e vídeo.

A UIT [28] estabelece em recomendações das séries BS (*Broadcasting Service – Sound*) e BT (*Broadcasting Service – Television*) metodologias e parâmetros para a avaliação da qualidade sonora ou visual dos sistemas de radiodifusão, como as mencionadas a seguir:

- recomendação UIT-R BS.1387-1: *Method for objective measurements of perceived audio quality*;
- recomendação UIT-R BT.500-11: *Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*;
- recomendação UIT-R BT.710-4: *Subjective assessment methods for image quality in high-definition television*.

Neste momento, cumpre esclarecer outras definições de interesse dos serviços de radiodifusão [24]:

- área de serviço: é a área limitada pelo lugar geométrico dos pontos de um determinado valor de intensidade de campo;
- contorno protegido: é o lugar geométrico dos pontos onde o valor de intensidade de campo é aquele tomado como referência de sinal desejado e para o qual é assegurada a relação mínima sinal desejado/sinal interferente estipulada para o serviço;
- contorno interferente: é o lugar geométrico dos pontos onde o valor de intensidade de campo é aquele obtido em função da relação

mínima sinal desejado/sinal interferente estipulada para o serviço e do valor da intensidade de campo do contorno protegido;

- relação de proteção: é a relação mínima entre o sinal desejado e o sinal interferente que assegura a proteção para o serviço.

Para os sistemas de radiodifusão de transmissão de TV analógica, temos ainda as definições de contorno 1, 2 e 3, que definem áreas limites a serem consideradas no projeto [27]. Cumpre observar que para outros sistemas de radiodifusão, como rádio FM e de rádio AM, os valores de intensidade de campo nos limites dos contornos certamente irão variar, como poderão variar também as definições para os contornos.

Do exposto, observamos que para o funcionamento adequado de um sistema de radiodifusão é importante que seja mantida uma determinada relação de proteção.

Os contornos 1, 2 e 3 determinam áreas para o atendimento de acordo com a sua ocupação, como áreas rurais, urbanas e urbanas densa. A forma de ocupação da área sob análise afeta, também, a constante de propagação que faz parte do modelo de propagação utilizado pela Recomendação UIT-R P.1546-1 [22]. Este modelo aplica-se à faixa de frequências da radiodifusão sonora em FM e para TV. O modelo para radiodifusão sonora em AM ou nas faixas de HF devem considerar as peculiaridades da propagação nestas faixas como a presença de ondas terrestres e celestes. Todos estes modelos são utilizados para a determinação do raio de cobertura e conseqüentemente da área negada.

Na determinação do espaço geométrico negado por um transmissor deve-se observar que o valor do limite de distância que corresponde a esta área está relacionado à uma solução de compromisso entre outras duas distâncias, que são o raio para o contorno interferente e o raio para o contorno interferido na direção que uniria as duas estações sob análise. A figura 6 ilustra um exemplo para obtenção do espaço geométrico negado.

Cumpre observar que no caso da figura:

- as potências de transmissão decrescem de E_3 para E_1 , ou seja,

$$P_{E_3} > P_{E_2} > P_{E_1};$$

- as regiões circulares são representativas da área de cobertura, pois com os efeitos da topografia e do ambiente da região de propagação, esta área tende a se deformar;
- para antenas direcionais deve-se usar o conceito de área do setor circular definido anteriormente;
- o limite para o atendimento às condições de operação dos sistemas é que o contorno interferente de uma estação não pode se sobrepor ao contorno protegido de outra.

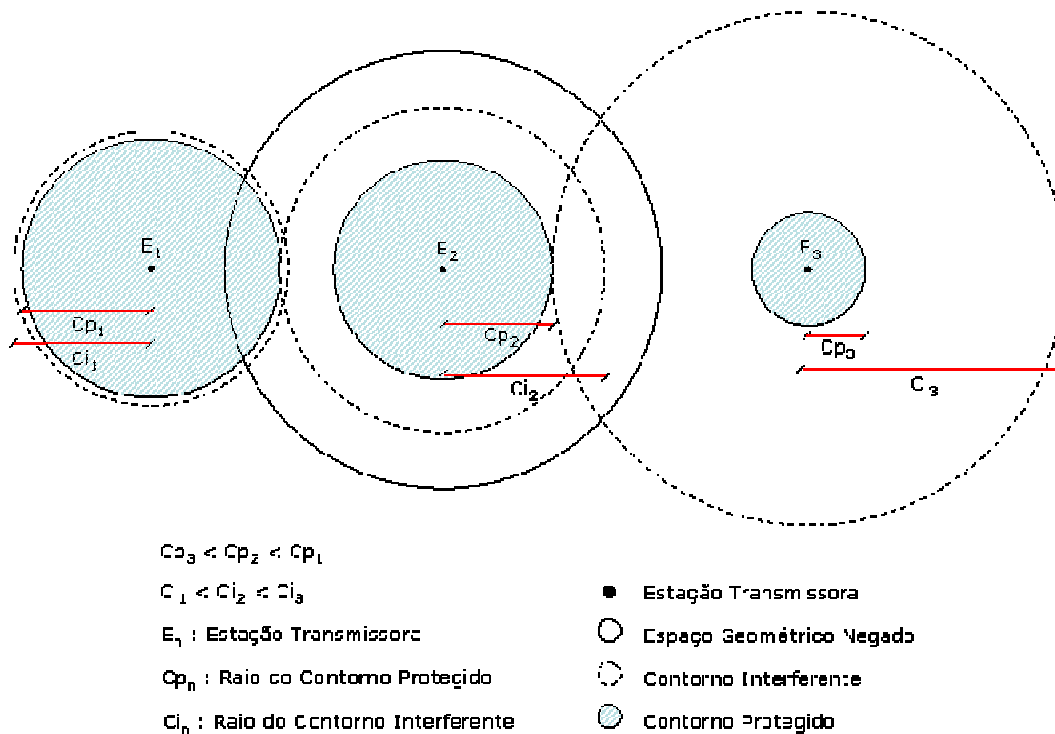


Figura 2. Representação dos contornos protegido e interferente

Observamos que a definição dos contornos depende intimamente da relação sinal-interferência. Com a manutenção das demais características do ambiente e o aumento da potência de transmissão da estação sob análise, o sinal nos receptores dentro de sua área de cobertura será aumentado em relação ao nível de interferência, aumentando, portanto, a relação sinal-interferência nestes receptores. Como consequência, o contorno protegido será menor. Em contrapartida, o contorno interferente será maior com o aumento da potência de transmissão, pois quanto maior a intensidade de sinal transmitida, maior será o seu alcance. Neste sentido, o compromisso entre os contornos interferente e

interferido para a determinação do espaço geométrico negado deve levar em consideração os parâmetros de transmissão da estação. É importante lembrar que os valores de intensidade de campo que definem os contornos interferentes e interferidos são constantes para valores máximos de potência de transmissão de cada classe e faixa de frequências de operação da estação, conforme regulamentação. A seguir é apresentada, como exemplo, a tabela de classes de potência para TV analógica.

Tabela 2. Classificação das estações para requisitos máximos

Classe		Canal	Máxima Potência ERP	Altura de Referência Acima do Nível Médio da Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
TV	RTV				
ESPECIAL	-----	2 - 6	100 kW (20 dBk)	150	63
		7 - 13	316 kW (25 dBk)		66
		UHF	1600 kW(32 dBk)		53
A	A	2 - 6	10 kW (10 dBk)		42
		7 - 13	31,6 kW (15 dBk)		46
		UHF	160 kW (22 dBk)		40
B	B	2 - 6	1 kW (0 dBk)	25	
		7 - 13	3,16 kW (5 dBk)	28	
		UHF	16 kW (12 dBk)	26	
C	C	2 - 6	0,1 kW (-10 dBk)	14	
		7 - 13	0,316kW (-5 dBk)	16	
		UHF	1,6 kW (2,04 dBk)	14	

As recomendações do UIT-R, da série P [28], orientam como calcular E (L,T) como sendo o valor estimado da intensidade de campo excedida em L% dos locais, durante pelo menos T% do tempo. Dentre as recomendações podemos citar:

- Recomendação UIT-R P.368-7: *Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz;*
- Recomendação UIT-R P.533-7: *HF propagation prediction method;*
- Recomendação UIT-R P.1147-2: *Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1 700 kHz;*
- Recomendação UIT-R P.1546-1: *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz [22].*

Utilizando-se dos modelos de propagação contidos nas recomendações e os valores dos contornos protegido e interferente para cada sistema de radiodifusão,

podemos obter os valores das distâncias para determinação do espaço geométrico negado. Somente por meio de método computacional e com ajuste dos modelos de propagação com a realização de campanhas de medidas pode-se determinar com maior precisão as áreas dos contornos, bem como o espaço geométrico negado.

A seguir, é mostrado um exemplo de como calcular a área negada para um sistema de radiodifusão de TV. As áreas de serviço para as estações destes sistemas constam da tabela apresentada a seguir.

As curvas E (50,50) e E (50,10) constam dos anexos ao regulamento aprovado pela Resolução nº 284, da Anatel [27].

Por motivo de facilidade nos cálculos, definimos um sistema com potência e.r.p. de transmissão de 1 kW, radiada de um dipolo de meia-onda, com altura do centro de radiação da antena sobre o nível médio da radial de interesse de 150 m. A e.r.p. considerada é a radiada no plano horizontal com inclinação elétrica ou mecânica do lóbulo principal do feixe (*tilt* elétrico ou mecânico) nas direções de interesse. A altura do receptor é de 10 m.

O primeiro passo é a obtenção dos dados sobre a topografia do local a ser atendido. O regulamento exige que sejam levantados o nível médio do terreno para radiais em, pelo menos, 12 direções a partir do local da antena, com espaçamento angular de 30° entre elas. Deve ser avaliado, também, o trajeto para propagação, ou seja, se ela acontecerá sobre água ou sobre terra. Quando forem utilizadas antenas direcionais, as radiais deverão ser tomadas com espaçamento angular de 15° entre elas, dentro do setor de radiação, a partir da direção de máxima propagação.

O próximo passo será a avaliação dos valores dos contornos a serem considerados.

O passo seguinte refere-se à determinação do valor da intensidade de campo do sinal interferente pela aplicação da relação de proteção correspondente a cada situação sobre o valor de intensidade de campo a proteger.

De posse destes dados do sistema, devemos calcular as distâncias para atendimento dos requisitos de operação, bem como de não-interferência.

A já mencionada Recomendação UIT-R P.1546-1 [22] apresenta um procedimento passo-a-passo para obtenção dos valores de intensidade de campo. Neste exemplo, o valor determinado para o contorno interferente é o que

considera as curvas E (50,10) de acordo com as características de transmissão da estação.

O valor de intensidade máxima de campo será:

$$E_{\max} = E_{fs} + E_{se} \text{ [dB] } (\mu\text{V/m}) \quad (64)$$

onde: E_{fs} é a intensidade de campo em espaço livre para uma e.r.p. de 1 kW; e
 E_{se} é a intensidade de campo para trajetos sobre a água.

Para facilitar nossa avaliação, consideraremos somente trajetos sobre terra, obtendo o seguinte valor de intensidade de campo:

$$E_{\max} = E_{fs} = 106,9 - 20 \log(d) \text{ [dB] } (\mu\text{V/m}) \quad (65)$$

onde: d é a distância em km.

Em princípio não é necessário inserir qualquer tipo de correção, porém como o método da recomendação em questão é baseado em curvas de intensidade de campo para determinadas distâncias, frequências, altura da antena transmissora da base ou receptora do usuário, porcentagem de tempo ou de cobertura, e tipos de trajeto, existem várias formas de interpolação dessas grandezas para adequação aos valores desejados.

A perda básica de transmissão é dada pela eq. (66).

$$L_b = 139 - E + 20 \log(f) \text{ [dB]} \quad (66)$$

onde: E é a intensidade de campo em dB ($\mu\text{V/m}$) para 1 kW de e.r.p.; e
 f é a frequência em MHz.

Considerando as eq. (65) e (66) pode-se, então, determinar a distância em cada direção (azimute) considerada que resultará na área negada (contorno interferente) por um determinado transmissor:

$$d = 10^{\left[\frac{L_b}{20} - 1,605 - \log(f) \right]} \text{ [km]} \quad (67)$$

Assim, considerando-se os valores de campos interferente e interferido, determinamos os contornos das áreas negada e de cobertura, respectivamente, pela aplicação da eq. (67) à eq. (63).

5.3.3.

Largura de faixa de frequências (B)

As faixas de frequências de operação destinadas e regulamentadas para os serviços de radiodifusão no Brasil, as larguras de faixa de canal e a regulamentação associada, estão mostradas na tabela a seguir:

Tabela 3. Largura de faixa e regulamentação para radiodifusão

FAIXA DE FREQUÊNCIAS E DESTINAÇÃO	LARGURA DE FAIXA DE CANAL	REGULAMENTAÇÃO
525 - 1605 kHz 1605 - 1705 kHz RADIODIFUSÃO - Onda Média	10 kHz	RESOLUÇÃO ANATEL N° 116/99 (D.O.U. de 26.03.99) RESOLUÇÃO ANATEL N° 117/99 (D.O.U. de 29.03.99)
2300 - 2495 kHz (120m) 3200 - 3400 kHz (90m) 4750 - 4995 kHz (60m) 5005 - 5060 kHz (60m) RADIODIFUSÃO - Onda Tropical	10 kHz	RESOLUÇÃO ANATEL N° 116/99 (D.O.U. de 26.03.99) RESOLUÇÃO ANATEL N° 117/99 (D.O.U. de 29.03.99) PORTARIA MC N° 25/83 (D.O.U. de 28.02.83) PORTARIA SNC N° 75/90 (D.O.U. de 19.09.90)
5950 - 6200 kHz (49m) 9500 - 9775 kHz (31m) 11700 - 11975 kHz (25m) 15100 - 15450 kHz (19m) 17700 - 17900 kHz (16m) 21450 - 21750 kHz (13m) 25670 - 26100 kHz (11m) RADIODIFUSÃO - Ondas Curtas	10 kHz	PORTARIA MC N° 25/83 (D.O.U. de 28.02.83) PORTARIA SNC N° 73/90 (D.O.U. de 19.09.90) PORTARIA SNC N° 75/90 (D.O.U. de 19.09.90)
87,8 - 88 MHz 88 - 108 MHz RADIODIFUSÃO COMUNITÁRIA RADIODIFUSÃO SONORA EM FM	200 kHz	RESOLUÇÃO ANATEL N° 60/98 (D.O.U. de 24.09.98) RESOLUÇÃO ANATEL N° 67/98 (D.O.U. de 12.11.98) RESOLUÇÃO ANATEL N° 125/99 (D.O.U. de 06.05.99)
54 - 72 MHz 76 - 87,8 MHz 174 - 216 MHz 470 - 608 MHz 614 - 746 MHz RADIODIFUSÃO DE SONS E IMAGENS e RETRANSMISSÃO DE TELEVISÃO	6 MHz	PORTARIA MC N° 38/74 (D.O.U. de 07.02.74) RESOLUÇÃO ANATEL N° 284/2001 (D.O.U. de 02.12.2001) RESOLUÇÃO ANATEL N° 291/2002 (D.O.U. de 15.02.2002)
746 - 806 MHz REPETIÇÃO DE TELEVISÃO (RpTV)	6 MHz	PORTARIA MC N° 139/73 (D.O.U. de 14.03.73) RESOLUÇÃO ANATEL N° 82/98 (D.O.U. de 31.12.98)

Como para os sistemas do serviço de radiodifusão operando na mesma faixa, a largura de faixa de canal utilizada e a técnica de modulação são as mesmas, não há como diferenciá-los ou analisarmos a sua eficiência por meio somente deste termo, apesar de considerá-lo. Neste caso, esta largura de faixa diferenciará somente sistemas analógicos de digitais.

5.3.4. Tempo (T)

A autorização da maioria dos sistemas de radiodifusão se refere à operação durante todo o dia (24 horas). Como algumas estações não transmitem programação durante todo o período, este fator influencia, também, na quantidade de informação transmitida, uma vez que ela será reduzida da fração do tempo em que a estação estiver fora do ar. Além disto, sistemas de radiodifusão que operam em frequências na faixa das ondas médias ou inferiores devem efetuar redução de potência nos termos da regulamentação [24], conforme observado a seguir:

“... ”

As emissoras que tenham especificadas na Licença de Funcionamento de Estação potências diurna e noturna de valores diferentes devem observar os horários para efetuar as alterações diárias de potência, de acordo com sua localização geográfica e época do ano.

...”

É importante observar que esta redução de potência afetará o índice de eficiência na proporção da diminuição causada na área de cobertura. Assim, o fator que influenciará no tempo a ser considerado será:

$$T = \frac{T_c}{T_{op}} \quad (68)$$

onde: T_{op} é o tempo real de operação da emissora; e

T_c é o tempo em que a emissora deve permanecer em operação conforme determina o contrato de concessão ou licença para funcionamento.

5.3.5. Sistemas digitais de radiodifusão

Com a digitalização dos sistemas de radiodifusão, a eficiência de utilização do espectro aumentará na proporção da utilização das novas tecnologias como, por exemplo, as apresentadas a seguir para TV digital:

- transmissão simultânea de diversos programas de TV digital em um único canal de radiofrequências;
- utilização de potências de transmissão menores para cobrir as mesmas áreas devido à maior imunidade a ruído e interferência pelos sistemas digitais;
- melhor qualidade de som e imagem;
- utilização do conceito de reuso de frequências;
- implantação de redes nacionais operando na mesma frequência em áreas geográficas adjacentes sem a presença de interferência prejudicial;
- possibilidade de recepção móvel sem a ocorrência de problemas típicos dos sistemas analógicos (imagem duplicada, reflexão, distorção, etc.);
- possibilidade de transmissão simultânea de dados.

Estas vantagens podem ser extendidas, na sua maioria, para sistemas de radiodifusão sonora digital.

Em vista do exposto, observamos que a eficiência será aumentada consideravelmente, já que a utilização dos sistemas digitais refletem positivamente em todas as variáveis relevantes para determinação da eficiência de utilização do espectro. A quantidade de informação é a grandeza alterada mais significativamente, pois a qualidade de imagem e som será objetivamente melhorada, assim como a utilização de técnicas de compressão e modulação digital aumentarão a transferência de informação para o usuário. A imunidade a interferência e a ruído permitirá a utilização de equipamentos mais eficientes, enquanto a possibilidade de reuso de frequências permitirá a repetição de canais em distâncias inferiores às atualmente aplicadas para canais analógicos.

Os sistemas digitais com as características apresentadas enquandram-se, portanto, para avaliação de sua eficiência, como uma combinação entre os

métodos definidos para sistemas ponto-área e os sistemas de radiodifusão analógicos.

5.3.6. Cálculo da EUE

Com a definição das variáveis para o cálculo da EUE aplicada aos sistemas de radiodifusão obtemos a seguinte expressão:

$$EUE = \frac{N_c \cdot p \cdot a \cdot \rho \cdot A_c}{B \cdot A_n \cdot T} \text{ [residência/kHz.km}^2\text{]} \quad (69)$$

onde: N_c é o número de canais utilizados pelo sistema;
 p é a penetração de receptores do sistema;
 a é a audiência da emissora;
 ρ é a densidade de residências na área de cobertura;
 A_c é a área de cobertura;
 B é a largura de faixa de canal;
 A_n é a área negada pela operação do sistema sob análise;
 T é o fator referente ao tempo.

Desta forma, partimos da expressão definida pela UIT [2] particularizando-a para aplicação a sistemas de radiodifusão, analógicos ou digitais.

5.4. Comparação entre diferentes sistemas

A comparação entre eficiências técnicas de uso do espectro de diferentes serviços deve ser encarada de forma bastante cuidadosa, uma vez que certas aplicações de baixa eficiência técnica, como telemetria, tele-controle e serviços de emergência, citando somente alguns exemplos, são altamente relevantes e não podem ter sua importância minimizada pela consideração exclusiva do critério de eficiência técnica. Além disto, ao selecionar os indicadores técnicos mais indicados para cada serviço, resultam quantidades distintas. Por exemplo, no caso de sistemas de acesso, o indicador é expresso em quantidade de informação (Erlangs ou bits por segundo) por unidade de área, por unidade de frequência. Já no caso de sistemas de transporte como sistemas terrestres ponto-a-ponto, foi

incluída no indicador a distância sobre a qual a informação é transportada, resultando num indicador expresso em Erlangs ou bits por segundo, por unidade de comprimento, por unidade de frequência. Por sua vez, no caso dos sistemas de radiodifusão, a quantidade de informação é definida em termos de número de usuários atingidos simultaneamente, por unidade de área, por unidade de frequência. Evidentemente, não é possível comparar quantidades dimensionalmente diferentes.

Feita a ressalva quanto ao indicador técnico como parâmetro único de comparação entre diferentes classes de sistemas e diferentes serviços, para atender à necessidade de algum parâmetro de comparação e contornar a dificuldade em relação à dimensão dos parâmetros envolvidos, é definido a seguir um indicador mais geral que permite a comparação entre sistemas de diferentes classes de aplicações.

O indicador selecionado para a comparação entre sistemas é a definição geral de uso eficiente do espectro recomendada pelo ITU-R [2] que pode ser reescrita como a quantidade de informação transferida por unidade de tempo dividida pelo produto da quantidade de espectro e espaço geométrico negados a outros sistemas:

$$EUE = \frac{M/T}{B \cdot S} \quad (70)$$

A dificuldade principal na utilização deste indicador para a comparação entre sistemas é encontrar definições comuns para os parâmetros envolvidos. No caso da quantidade de espectro e do espaço geométrico negados as definições apresentadas nas seções anteriores já atendem a este requisito. O mesmo não ocorre com a quantidade de informação por unidade de tempo, para a qual métricas comuns a todas as classes de sistema são estabelecidas. É importante ressaltar que estas métricas são, em geral, menos precisas do que as recomendadas para sistemas de classes específicas como apresentado anteriormente, sendo sugeridas apenas para o caso de comparações entre sistemas de diferentes classes.

Para sistemas de transmissão de voz, a quantidade de informação transmitida por unidade de tempo foi expressa em Erlangs, enquanto que para sistemas de transmissão de dados foi utilizada a taxa de transmissão em bits por segundo.

Nenhuma destas duas medidas é adequada para aplicação aos atuais sistemas analógicos de radiodifusão. Nestes sistemas a quantidade de informação transferida foi medida pelo número de usuários simultâneos, associada à audiência da emissora e à penetração dos sistemas.

A única maneira de uniformizar a medida de informação transferida para sistemas tão distintos parece ser utilizar a quantidade de usuários servidos. Dependendo da base de tempo escolhida para esta avaliação, este parâmetro pode ser de difícil determinação. Uma boa opção parece ser a adoção da hora de maior movimento como referência e admitir, para sistemas ponto-área e sistemas ponto-a-ponto, a utilização plena da capacidade instalada. Assim, para sistemas ponto-área e sistemas ponto-a-ponto analógicos, a quantidade de informação por unidade de tempo é:

$$\frac{M}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{usuários}}} \tau_i}{3600} \cong \frac{n_{\text{canais}}}{3600} \quad (71)$$

onde: τ_i é o tempo de utilização por usuário;

$n_{\text{usuários}}$ é o número de usuários do sistema na HMM;

n_{canais} é o número de canais disponíveis para utilização simultânea.

Já para sistemas de radiodifusão a quantidade de informação por unidade de tempo é:

$$\frac{M}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{usuários}}} \tau_i}{3600} \cong \frac{n_{\text{aud}}}{3600} \quad (72)$$

onde: n_{aud} é a audiência média, em usuários, durante a hora de maior audiência.

Os parâmetros dados pelas eq. (71) e (72) possuem a mesma dimensão (inverso do tempo), o que permite sua comparação.

No caso de sistemas digitais, a medida da quantidade de informação pode ser refinada sendo representada pelo somatório das taxas entregues a cada usuário individual. Para sistemas ponto-área e sistemas ponto-a-ponto digitais, a quantidade de informação por unidade de tempo fica, então, igual a:

$$\frac{M}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{usuários}}} R_{b_i} \tau_i}{3600} = R_{b_{\text{média}}} \cong R_{b_{\text{total}}} \quad (73)$$

onde: R_{b_i} é a taxa de transmissão para o i-ésimo usuário;
 τ_i é o tempo de utilização do i-ésimo usuário;
 $n_{\text{usuários}}$ é o número de usuários que utilizam o sistema na HMM;
 $R_{b_{\text{média}}}$ é taxa de transmissão média na HMM [bps]; e
 $R_{b_{\text{total}}}$ é capacidade total do sistema [bps].

Para sistemas de radiodifusão digital a quantidade de informação por unidade de tempo fica igual a:

$$\frac{M}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{usuários}}} R_b \tau_i}{3600} = R_b n_{\text{aud}} \quad (74)$$

onde: R_b é a taxa de transmissão do sistema de radiodifusão digital.

Novamente, os parâmetros dados pelas eq. (73) e (74) possuem a mesma dimensão (bits por segundo), o que permite sua comparação.