

4. Indicadores absolutos e relativos

Em praticamente todas as publicações e estudos sobre eficiência de utilização do espectro de radiofrequências, o ponto de partida é o método geral sugerido pela UIT, definido na Recomendação UIT-R SM.1046 [2], e que será explorado neste capítulo.

A eficiência espectral relativa, também tratada neste capítulo, é definida para possibilitar a comparação entre sistemas que se propõem a atender uma mesma aplicação.

Além do método da UIT, existem outros organismos internacionais que sugerem formas de cálculo de um índice de eficiência para os sistemas de telecomunicações, porém limitam-se a determinada tecnologia ou aplicação. Estes métodos são também tratados a seguir.

4.1. Indicadores absolutos de eficiência

A fim de subsidiar a definição de critérios para avaliação do uso eficiente e adequado do espectro, este estudo baseou-se em um levantamento de recomendações, normas e padrões existentes, gerados pela União Internacional de Telecomunicações (UIT), *Federal Communications Commission* (FCC) e *National Telecommunications and Information Administration* (NTIA), dos Estados Unidos da América, e outros organismos e agências reguladoras internacionais, além de trabalhos publicados na literatura técnica em geral, sobre o uso eficiente do espectro.

A partir deste levantamento foi realizada uma seleção e análise de indicadores de uso do espectro, de caráter conceitual e geral, independentes do tipo de aplicação ou tecnologias específicas. Este capítulo discute os indicadores absolutos para avaliar a eficiência de uso do espectro.

4.1.1. Indicadores da UIT para o uso eficiente do espectro

Neste item são apresentados os indicadores técnicos gerais de uso eficiente do espectro, como definidos nas recomendações e manuais do UIT-R [2,13].

4.1.1.1. Conceito de utilização do espectro

As variáveis básicas que caracterizam o uso do espectro são a largura de faixa de frequências do canal, a região geométrica afetada pelo transmissor e, no caso de operação não contínua, a fração do tempo durante a qual o sistema está ativo. Assim, a utilização do espectro pode ser definida, de forma genérica, como o produto destas três variáveis:

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (11)$$

- onde:
- U é a quantidade de espectro utilizada;
 - B é a largura de faixa de frequências;
 - S é o espaço geométrico; e
 - T é o tempo.

A utilização do espectro é definida como o espaço espectral negado à implantação de novos sistemas pela existência do sistema considerado.

Para calcular esta medida é necessário supor que se deseja adicionar novos transmissores e receptores na faixa de frequências considerada e determinar que frequências, regiões espaciais e intervalos de tempo são negados a estes novos transmissores e receptores. Assim, esta determinação depende não só das características dos sistemas existentes mas, também, das características do novo sistema. Conseqüentemente, a eq. (11) é uma fórmula geral conceitual que, para ser aplicada, necessita particularização dependendo dos sistemas sob análise.

4.1.1.2. Conceito de espaço espectral negado

O espaço espectral negado é a região cujas dimensões são a faixa de frequências, o espaço geométrico e o tempo, e sua utilização é negada pelo sistema existente a outros sistemas.

O conceito se aplica tanto a transmissores como a receptores. O espaço espectral negado por um transmissor ou, simplesmente, espaço do transmissor, é o espaço multidimensional (faixa frequências, espaço geométrico e tempo) em que a presença deste transmissor impede a utilização de receptores de um novo sistema. Analogamente, o espaço espectral negado por um receptor ou, simplesmente, espaço do receptor, é o espaço espectral em que a presença deste receptor impede a utilização de transmissores de um novo sistema. A soma dos espaços dos transmissores e receptores corresponde ao espaço espectral utilizado pelo sistema.

Dependendo do modelo considerado, os espaços espectrais de transmissores e receptores podem ser calculados separada ou conjuntamente. No caso de sistemas ponto-área e sistemas de radiodifusão, em que a localização dos receptores é desconhecida, apenas o espaço espectral dos transmissores é relevante. Já no caso de sistemas de radioastronomia, por exemplo, apenas o espaço espectral dos receptores define o uso do espectro. Já no caso de sistemas ponto-a-ponto, tanto o espaço espectral dos transmissores como o dos receptores são relevantes.

4.1.1.3. Espaço geométrico negado

Embora, em geral, o espaço geométrico seja um volume, em muitos casos apenas duas dimensões são, de fato, de interesse. No caso de sistemas móveis o espaço geométrico de interesse é normalmente uma área. Já para sistemas terrestres ponto-a-ponto utilizando antenas altamente diretivas, um setor angular em torno de um ponto pode ser a melhor escolha.

O espaço geométrico depende da localização de transmissores e receptores e da direção de apontamento e diagramas de radiação das antenas utilizadas.

4.1.1.4. Faixa de frequências negada

Este fator deve incluir os efeitos da modulação, dos filtros de FI e da faixa de frequências ocupada resultante, da rejeição de frequências fora da faixa (filtragem), do processamento de sinais e das modulações ortogonais, dos limites de relação sinal-interferência (S/I), do efeito de espúrios e de quaisquer outros fatores que afetem a resposta do sistema no que diz respeito à frequência. No caso de sistemas de espalhamento espectral, é importante observar que a emissão pelo sistema em uma determinada faixa não inviabiliza, necessariamente, a sua utilização por outros sistemas.

4.1.1.5. Tempo negado

Este termo inclui todos os fatores relativos ao ciclo de operação (*duty cycle*) do sistema. É particularmente relevante em sistemas de radar e outros sistemas com modulação pulsada, em sistemas de múltiplo acesso por divisão no tempo (TDMA) e em sistemas de radiodifusão.

4.1.1.6. Eficiência de utilização do espectro

O indicador geral recomendado pelo UIT-R para a avaliação do uso do espectro é a eficiência de utilização do espectro [2], dada por:

$$EUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} \quad (12)$$

onde: M é a quantidade de informação transferida.

A eficiência de uso do espectro é definida como a razão entre a quantidade de informação transferida e a utilização do espectro para transferência desta quantidade de informação.

Este parâmetro depende, intrinsecamente, do tipo de aplicação considerada. De uma forma geral, para sistemas de voz a expressão pode ser reescrita na forma:

$$EUE = \frac{T_T}{B \cdot S} \quad (13)$$

onde: T_T é o tráfego expresso em Erlang.

Para sistemas de transmissão de dados têm-se, por exemplo:

$$EUE = \frac{R_b}{B \cdot S} \quad (14)$$

onde: R_b é a taxa de transmissão expressa em bits/segundo.

As expressões anteriores são genéricas e conceituais, necessitando de definições e detalhamento adicional para aplicação a sistemas específicos. A definição adequada da quantidade de informação transferida pode ser menos óbvia em, por exemplo, sistemas de radiodifusão ou mesmo de muito difícil definição no caso de sistemas de radar ou de aviso de emergências. Ela pode, portanto, não ser aplicável a certos sistemas particulares para os quais serão necessários conceitos e definições alternativas de utilização do espectro.

4.1.2. Outros indicadores

Além dos indicadores gerais de eficiência de uso do espectro, é possível encontrar na literatura propostas de outros indicadores, em geral para tipos de serviço e aplicações específicas, utilizados por órgãos reguladores, instituições governamentais, órgãos de indústria e pela academia.

Via de regra, todas as propostas, quer sejam de agências reguladoras internacionais, quer sejam de organismos regionais e mundiais ou instituições de pesquisa, baseiam-se no conceito de uso do espectro conforme definido pelo UIT-R [2]. Da mesma forma, as proposições concordam que a definição de uma eficiência relativa de uso do espectro torna a tarefa de obtenção de indicadores numéricos que definam o quanto determinado sistema é eficiente menos complexa, menos sujeita a erros e, em especial, traz embutida a possibilidade de interpretação mais concreta do resultado obtido (por comparar o sistema de interesse com uma referência bem conhecida).

A seguir são apresentadas as particularidades de cada proposta analisada, buscando evidenciar as diferenças e o detalhamento de parâmetros envolvidos nos cálculos.

4.1.2.1. NTIA

A NTIA (*National Telecommunication Industry Association*), do Departamento de Comércio dos Estados Unidos da América, apresenta um conjunto de propostas de indicadores de uso eficiente do espectro no relatório NTIA *Report* 94-311 [14]. Este documento apresenta, inicialmente, definições de eficiência de uso do espectro para sistemas de comunicações via rádio de forma geral e em seguida particulariza estas definições para alguns tipos de sistemas rádio móveis atuais para que possam ser comparados com relativa facilidade.

A proposta da NTIA é fortemente baseada na introdução de aproximações e premissas nos indicadores gerais que, embora envolvam um certo grau de subjetividade, não afetam o objetivo final de estabelecer índices que permitam a comparação entre sistemas similares no que tange ao uso eficiente do espectro.

4.1.2.1.1. Definições alternativas para quantidade de informação transmitida

A motivação para o estabelecimento de uma definição alternativa para a quantidade de informação transmitida reside no fato de que as definições até aqui apresentadas, como tráfego telefônico ou taxa de transmissão de dados, não consideram a distância percorrida pela informação ou a quantidade de locais onde os dados transmitidos podem ser recebidos.

A consideração sobre estes aspectos na definição da quantidade de informação é importante, pois sistemas rádio desempenham basicamente duas funções: acesso e transporte. O acesso provê ao usuário uma maneira conveniente de acessar informação disponibilizada em pontos, em geral, próximos de sua localização. O transporte envolve a transferência de informação entre pontos de acesso. Por exemplo, a função dos sistemas microondas ponto-a-ponto é a de transporte, enquanto que a função de um telefone celular é de acesso. Sistemas tradicionais de radiodifusão usualmente desempenham tanto a função de

transporte como a de acesso. Atualmente, a tendência é que o transporte seja desempenhado primordialmente por sistemas de fibra ótica, ao passo que sistemas sem fio estão sendo otimizados para atuação intensiva na porção de acesso.

Com base no exposto, as eq. (15) e (16) podem ser consideradas a versão acesso do índice de eficiência de uso do espectro e estão consistentes com os novos paradigmas das comunicações, onde a principal função do sistemas de comunicação sem fio é a de prover acesso à informação. Está omitido, entretanto, o papel de transporte que também é desempenhado por muitos sistemas rádio.

Para sistemas de transporte de informação pode-se utilizar um indicador mais adequado de eficiência de uso do espectro. A NTIA [14] propõe a seguinte expressão, que considera a distância sobre a qual é transportada a informação:

$$Q_T = \frac{I \times D}{U} \quad (15)$$

- onde: Q_T é a eficiência de uso do espectro (versão transporte);
 I é a taxa de transferência da informação;
 D é a distância sobre a qual a informação é transmitida; e
 U é a quantidade de espectro utilizada.

A eficiência de uso do espectro, versão transporte, é definida como a razão entre a taxa de transferência de informação multiplicada pela distância sobre a qual ocorre a transferência e a utilização do espectro utilizada para esta transferência.

Já para aplicações de radiodifusão (*broadcasting*) é necessária outra definição, uma vez que não são conhecidos a identidade, a quantidade nem o posicionamento individual dos usuários. Além disto, o sistema não provê enlaces específicos para cada usuário. Nestes sistemas o objetivo é a criação de uma área de cobertura sendo que todos os receptores da região abrangida são potenciais usuários. O fator linear, D , da eq. (15) deve ser substituído pelo fator de área, A , levando à expressão a seguir:

$$Q_c = \frac{I \times A}{U} \quad (16)$$

- onde: Q_C é a eficiência de uso do espectro (versão cobertura);

I é a taxa de transferência da informação [bit/s];

A é a área de cobertura; e

U é a quantidade de espectro utilizada.

A eficiência de uso do espectro, versão cobertura, é definida como a razão entre a taxa de transferência de informação multiplicada pela área sobre a qual ocorre a transferência e a utilização do espectro nesta transferência.

As duas expressões anteriores, embora já incluam uma distinção entre dois tipos de sistema, necessitam ainda ser particularizadas para sua aplicação a sistemas específicos.

A escolha da expressão geral a ser particularizada e aplicada a cada sistema deve ser cuidadosa. Em um serviço de comunicações móveis celulares, a versão acesso da eq. (16) é, normalmente, a melhor escolha. Considere-se, entretanto, que o sistema celular em questão permita chamadas em grupo (todos os membros do grupo estarão escutando o tráfego de determinado canal). Se os usuários estão espalhados por uma grande área pode ser necessário transmitir as mensagens em muitas células da área total de cobertura. Nesta situação, a expressão de eficiência de uso do espectro versão cobertura pode ser mais interessante. A questão fundamental está no fato do sistema poder ou não identificar a localização dos usuários participantes do grupo. Se o sistema conhece esta localização, pode otimizar as transmissões para prover a comunicação minimizando o uso do espectro. Por outro lado, se o sistema desconhece a localização dos usuários, a forma de garantir recepção adequada da informação é provendo sinal em nível adequado sobre toda a área de cobertura. Neste caso a versão cobertura de eficiência de uso do espectro eq. (16) se aplica.

Argumentos semelhantes podem ser usados para os sistemas rádio de longo alcance. No caso de sistemas HF de longa distância, por exemplo, o receptor móvel pode estar a distâncias de cerca de 3000 km do transmissor, numa região onde não há nenhuma outra infra-estrutura de comunicação. É razoável questionar se o sistema está sendo usado para prover acesso ou transporte.

Uma condição suficiente, embora não necessária, para utilização da definição de uso eficiente do espectro versão transporte é a seguinte: esta

definição deve ser usada para sistemas rádio que requerem múltiplos lances (*hops*) para cobrir toda a distância de comunicação.

4.1.2.1.2.

Considerações sobre a dimensão geométrica do uso do espectro

Nessa seção são apresentadas considerações adicionais sobre o parâmetro S (espaço geométrico), presente na definição de utilização do espectro da UIT [2].

Embora espaço seja uma quantidade tridimensional (volume), frequentemente assume-se que o espaço de interesse esteja confinado em uma fina camada próxima à superfície da Terra. Se a espessura desta camada é menor que a distância de reuso de frequências, não há possibilidade de reuso de frequências na direção vertical. Dessa forma, o volume de interesse pode ser reduzido a uma superfície com base neste critério objetivo. Em situações em que a distância de reuso de frequências é muito pequena, a geometria deve ser considerada tridimensional, mesmo em sistemas terrestres. Tal situação ocorre em edifícios, onde o reuso pode ser realizado numa mesma área projetada com a separação de alguns andares.

Para enlaces ponto-a-ponto é sugerida uma definição “nodal” de uso do espectro. Esta definição, basicamente, dependente da espessura do feixe de energia gerado pelas antenas e pela característica dos lóbulos laterais de radiação.

4.1.2.1.3.

Outros fatores que influenciam a eficiência de uso do espectro

Além das modificações sugeridas nos indicadores clássicos de eficiência de uso do espectro, a NTIA discute em seu relatório [14] outros fatores técnicos relevantes que podem ser considerados numa avaliação mais completa de eficiência de uso do espectro. Cada fator é independente dos demais, podendo ser utilizado individualmente para a comparação entre tecnologias distintas.

A idéia básica por trás do desmembramento da eficiência em vários fatores, como descrito a seguir, é permitir a definição de vários indicadores que podem ser ponderados de maneira distinta, dependendo da aplicação considerada e das prioridades que venham a ser estabelecidas pela entidade responsável pela administração do espectro. Este enfoque permite também identificar as melhorias

que podem ser implementadas para aumentar a eficiência de uso do espectro. Os fatores sugeridos pela NTIA são apresentados a seguir, com a indicação de parâmetros relevantes associados a cada um deles.

Fatores de eficiência técnica:

- eficiência de configuração: quantas frequências são usadas por mensagem enviada?
- eficiência de enfileiramento: sistemas troncalizados; probabilidades de bloqueio;
- eficiência de compressão: algoritmos de compressão de voz e vídeo;
- eficiência de modulação: capacidade em bits/s/Hz;
- eficiência de alcance: reuso de frequências; tamanho de célula; controle de potência.

Fatores de eficiência no envio da mensagem:

- eficiência de decisão: enviar ou não a mensagem? Qual o tamanho da mensagem? Qual a sua prioridade?
- eficiência de modo de envio: usar rádio ou não?

Fatores de eficiência de gerência de espectro:

- eficiência de consignação de frequências: distâncias de separação entre frequências; regras de coordenação e de compartilhamento;
- eficiência de atribuição/destinação de faixas de frequências: adequação das faixas atribuídas/destinadas aos serviços a que se destinam.

Fatores de eficiência econômica:

- eficiência de recursos: o processo como um todo fornece máximo serviço por custo mínimo?

Embora apresente estes fatores como relevantes para uma análise mais completa da eficiência de uso do espectro, a NTIA não chega a propor uma metodologia para seu cálculo. No caso dos fatores de eficiência técnica, apresenta algumas indicações, descritas a seguir, que ainda assim envolvem um alto grau de subjetividade.

Eficiência de Configuração:

Este fator descreve a quantidade de radiofrequências que são necessárias para o envio de uma mensagem. Num sistema de envio de mensagens (tomado como referência), usa-se um par de frequências num modo *half-duplex*. Este

mesmo sistema poderia usar uma única frequência para envio e recepção (modo *simplex*). Um canal *full-duplex* ou um repetidor *half-duplex* usa dois canais no período de duração da mensagem, produzindo uma eficiência relativa de 0,5 para uma mensagem. Um canal *full-duplex* com um repetidor, usa quatro canais para envio da mensagem, produzindo uma eficiência relativa de 0,25.

Eficiência de Enfileiramento:

A quantidade de usuários que podem obter um determinado nível de serviço num sistema troncalizado depende de vários fatores: a quantidade de canais nos troncos de interconexão, o tempo médio que um usuário necessita do canal, o bloqueio máximo que poderia ser tolerado, etc. Por simplicidade, pode-se assumir que determinado sistema permita mais usuários do que outro sistema.

Eficiência de Compressão:

Este fator indica a capacidade adicional ou extra de um canal devido ao uso de técnicas de compressão digital. Na prática este fator está ligado aos requisitos de largura de faixa e modulação.

Eficiência de Modulação:

Este fator considera a eficiência de modulação e/ou a compressão de largura de faixa usada pelo sistema. Este termo está ligado aos fatores de eficiência de compressão dos sistemas digitais. Para a maior parte dos sistemas analisados este fator é a razão entre as larguras de faixa de canalização do sistema.

Eficiência de Alcance:

Este fator quantifica o reuso de frequências possível dentro de um sistema. O fator inclui o reuso de frequências que poderia ser realizado reduzindo a potência do transmissor, fazendo uso de antenas setorizadas, reduzindo a altura das antenas, realizando cobertura do terreno e em prédios, etc.

4.1.2.2.

IEEE 802 – Eficiência de sistemas de acesso sem fio

A eficiência de uso do espectro definida pela UIT [2] apresenta algumas dificuldades como a forma mais adequada para determinar a quantidade de informação e como considerar a quantidade de usuários que são servidos pelo sistema.

Como alternativa, o grupo IEEE 802, em comentário enviado para a Nota Pública da FCC [8], propõe uma métrica de eficiência de uso do espectro para sistemas de acesso sem fio denominada *Wireless Efficiency* (W_{eff}), dada por:

$$W_{\text{eff}} = \frac{(C \times N_s)}{B \times A} \text{ Bits} \cdot \text{Usuários} / m^2 \quad (17)$$

onde: W_{eff} é a eficiência do sistema sem fio;

C é a capacidade do sistema após a decodificação e demodulação e incluindo as particularidades do protocolo de rede e o período de transmissão (*duty cycle*) [bit/s];

N_s é a quantidade de conexões lógicas ou de usuários na rede, dentro de uma área de cobertura;

B a largura de faixa utilizada; e

A é a área coberta.

A eficiência de sistemas de acesso sem fio é definida como a razão entre o produto dos bits transmitidos pelo número de usuários servidos e o uso do espectro correspondente.

Esta métrica reflete bem a eficiência de uso do espectro para sistemas de acesso sem fio mas não é, também, de simples implementação, pela dificuldade em se obter alguns parâmetros como a quantidade de usuários e a capacidade real do sistema.

Comentários adicionais sobre a Nota Pública [8] sugerem a importância de:

- associar o critério de eficiência ao tipo de serviço usando diferentes métricas como bits/segundo/célula ou bits/segundo/Hertz/km² ou usuários/Hertz dependendo do serviço considerado;
- considerar que o número de dispositivos utilizados no sistema afeta a métrica de eficiência, pois medir a eficiência de um dispositivo somente em bits/segundo/Hertz é diferente de avaliar a eficiência de uso do espectro de um sistema como um todo. Como exemplo é citado o caso de sistemas sem fio para leitura remota de medições (telemetria) que, embora individualmente transmitam apenas poucos bits por dia, em conjunto podem apresentar uma alta eficiência de uso do espectro se o sistema possuir um grande número de sensores.

4.2. Índices de eficiência relativa

4.2.1. Eficiência espectral relativa

A eficiência de utilização do espectro não é um conceito absoluto, estando associada ao tipo de sistema e à faixa de frequências consideradas. Desta forma, para a comparação entre diferentes implementações de uma determinada aplicação ou tipo de serviço é útil estabelecer sistemas de referência e definir o conceito de eficiência espectral relativa (EER) [2, 13]. A EER é, então, a razão entre duas eficiências espectrais, podendo ser uma delas a de um sistema usado como padrão de comparação.

$$EER = \frac{EUE_C}{EUE_R} \quad (18)$$

onde: EUE_C é a eficiência de uso do espectro do sistema considerado; e
 EUE_R a eficiência de uso do espectro do sistema de referência.

A eficiência espectral relativa é definida como a razão entre as eficiências de uso do espectro do sistema considerado e de um sistema arbitrário de referência.

A relação entre duas eficiências pode ser muito mais útil que a análise do valor absoluto de uma eficiência que não se relaciona a nada familiar. É difícil concluir de forma clara e objetiva se uma eficiência de uso do espectro de 0,5 Mbits/s/MHz/m² é boa ou ruim. Por outro lado tem-se uma percepção mais nítida da situação quando se determina que o sistema A é, por exemplo, duas vezes mais eficiente que o sistema B.

São candidatos naturais a sistema de referência para um determinado serviço ou aplicação:

- aquele com a maior eficiência teoricamente possível;
- um sistema típico, detalhadamente definido; ou
- um padrão da indústria, quando existir.

A eficiência teórica máxima de um sistema pode ser obtida da teoria da informação a partir da Lei de Shannon [15], que relaciona a capacidade do canal com sua largura de faixa e a relação sinal-ruído:

$$C = B \log_2(1 + S / N) \quad (19)$$

onde: C é a capacidade [bit/s];
B é a largura de faixa [Hz]; e
S/N é a relação sinal-ruído.

Esta pode parecer, à primeira vista, a melhor opção como sistema de referência por tratar-se de uma medida absoluta. Porém, é extremamente difícil definir valores de relação sinal-ruído típicos para todos os sistemas em operação, pois diversos deles possuem características proprietárias, sendo esta eficiência, portanto, aplicável preferencialmente à sistemas típicos. Além disto, na maioria dos casos, a eficiência que pode ser obtida na prática é significativamente inferior a este valor teórico. Assim, a eficiência de um sistema “típico” pode ser uma referência mais adequada. Nos casos em que existe de fato, um padrão da indústria, esta é a referência natural e de mais fácil entendimento.

Embora as simplificações associadas ao uso de indicadores relativos sejam um atrativo para tornar o cálculo dos índices computacionalmente eficiente ou mesmo viável em alguns casos, cuidados devem ser tomados para que não se obtenha conclusões imprecisas. Neste sentido, é importante ressaltar que à quantidade de informação que pode ser transmitida e, conseqüentemente, à eficiência espectral, estão associadas uma qualidade de transmissão da informação [16]. Por exemplo, para uma dada relação sinal-ruído no receptor, a utilização de modulações com grande número de níveis permite obter elevada eficiência espectral mas resulta em uma degradação da taxa de erro de bits. Assim, a eficiência espectral relativa de dois sistemas deve ser avaliada em função da quantidade de informação transportada com uma mesma qualidade de transmissão, em geral associada à relação sinal-ruído, incluída a interferência.

O exemplo da figura 4 ilustra este conceito. O sistema 2 é espectralmente mais eficiente que o sistema 1, pois transporta maior quantidade de informação numa certa largura de faixa para um nível de qualidade de referência. A definição desta referência, para cada tipo de sistema, é uma questão adicional no

estabelecimento de indicadores de eficiência de uso do espectro e eficiência espectral relativa. Ela pode ser resolvida com a adoção de requisitos típicos de qualidade associados aos diferentes sistemas.

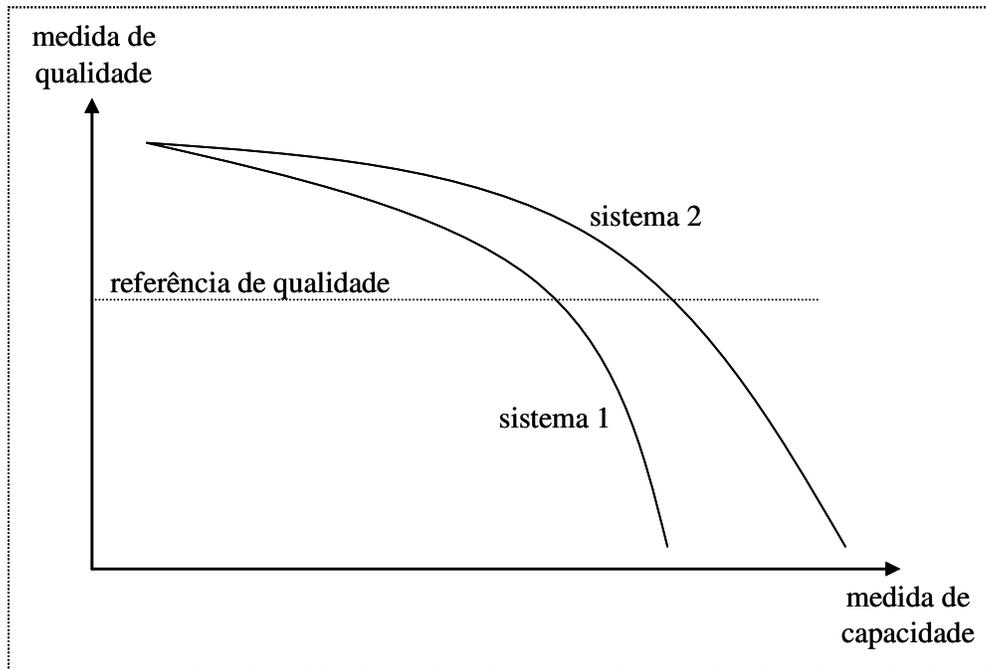


Figura 1. Relação entre qualidade e capacidade de sistemas

Como exemplo, considere-se a comparação entre dois sistemas idênticos em todos os aspectos, exceto na técnica de modulação empregada. Em uma primeira análise, simplista, a conclusão é de que um sistema com modulação 32-QAM é duas vezes mais eficiente que o sistema com modulação 16-QAM por utilizar metade da faixa para transmitir a mesma quantidade de informação. Uma análise mais cuidadosa mostra que, para um funcionamento adequado, o sistema 32-QAM requer melhores relações sinal-ruído e sinal-interferência, usualmente requerendo maior potência de transmissão. Essa situação é típica na análise por meio do conceito da eficiência relativa de uso do espectro de sistemas similares. Entretanto, com as devidas precauções (evidenciadas por essa análise simples), o uso deste conceito é bem mais simples que os cálculos da eficiência absoluta.

A fim de aplicar o conceito de eficiência espectral relativa aos sistemas típicos, deve-se estabelecer valores para o limiar de qualidade (normalmente uma relação portadora-interferência) para cada um destes sistemas, de forma a refletir a sua relação entre qualidade e capacidade.

O conceito de eficiência espectral relativa pode ser usado de forma bastante efetiva na comparação entre sistemas de tecnologias diferentes que fornecem o mesmo serviço, uma vez que a escolha de parâmetros de referência, sempre subjetiva, afeta igualmente os valores de EUE de ambos os sistemas. Este conceito pode ser estendido, também, para sistemas que operem serviços e tecnologias diferentes numa mesma área ou faixa de frequências.

Além disto, o cálculo direto da EER é, na maioria dos casos, bem mais simples do que o cálculo das EUE individuais, uma vez que, para sistemas que fornecem o mesmo serviço, fatores comuns de difícil computação cancelam-se quando é feita a razão entre as duas EUE.

4.2.2. Índice de qualidade espectral

Outro indicador relativo é o índice de qualidade espectral, que busca avaliar a utilização do espectro com base na real ocupação do canal ou do tráfego efetivamente transportado pelo sistema [13]. Este tipo de avaliação tem a vantagem de medir a quantidade de informação transferida pelo sistema ponderada pela demanda, em lugar de medir apenas sua capacidade de transporte de informação, conforme descrito pela eq. (20) e (21).

$$IQE = \frac{\sum \Gamma(n) \beta_i(n)}{\sum \Gamma(n) [\beta_i(n) + D_i(n)]} \quad (20)$$

e

$$\Gamma(n) = \frac{\beta_i(n)}{\beta_{total}} \quad (21)$$

onde: $\beta_i(n)$ é o número de unidades de uso do espectro demandadas no n-ésimo elemento de volume, igual ao número de unidades de uso do espectro (produto de largura de faixa de frequências, espaço geométrico e tempo) ocupadas naquele elemento de volume na hora de pico de utilização (ou hora de maior movimento, hmm); β_{total} é a demanda total, em unidades de uso do espectro, no volume V, igual à soma das demandas individuais em todas as unidades de volume, e

$D_t(n)$ é o número de unidades de uso do espectro adicionalmente negadas no n -ésimo elemento de volume, ou seja, o espaço espectral que, embora não seja utilizado para a transmissão de informação pelo sistema considerado, é negado a outros sistemas devido à necessidade de proteção contra interferências.

O índice de qualidade espectral pode ser utilizado de forma específica para avaliar com que eficiência o espectro está sendo utilizado por um determinado sistema para prover serviço em uma certa região. Por representar a fração do espaço espectral consumido que é utilizada para a efetiva transmissão de informação e ainda ponderar esta utilização pela demanda, é uma medida da qualidade da tecnologia e da qualidade da engenharia empregadas no atendimento da demanda por um serviço.

Embora o IQE seja um indicador bastante completo e preciso da eficiência técnica de uso do espectro, seu cálculo envolve um conjunto de informações que, na prática, são quase impossíveis de se obter, principalmente no que diz respeito à demanda em cada elemento de volume da região considerada. Talvez por este motivo, embora seja apresentado no manual de gerência de espectro do UIT-R [13], não foi incluído na Recomendação UIT-R P.1046 [2].