

Comunicações por Satélite – Técnicas de Transmissão, Multiplexação e de Acesso

Márcio Antônio Protzek, José Ricardo Descardecí

DEE-UFPR CEFET-PR - Brasil

Resumo — Em sistemas de satélite, as técnicas de transmissão (modulação), a multiplexação, os métodos de múltiplo-acesso, além das características do canal, interagem para a determinação da capacidade de transmissão [1]. Este *tutorial*, apresenta, de forma resumida e didática, uma revisão das principais técnicas de transmissão, multiplexação e múltiplo-acesso usadas na comunicação por satélites geoestacionários e que, empregadas de forma integrada, permitem o efetivo compartilhamento dos recursos desses sistemas. Assim, aborda-se as modulações FM e BPSK, as multiplexações FDM e TDM e é fornecida uma análise dos métodos de acesso FDMA, TDMA, CDMA. Faz-se, também, uma abordagem dos métodos de acesso randômico Aloha Pura e Discreta, além das alocações fixa e dinâmica.

Abstract — In satellite systems, the transmission techniques (modulation), multiplexation and multiple access methods as well as the channel characteristics work together to determinate the channel capacity. This tutorial shows a review of the principals transmission, multiplexation and multiple access methods used in geostacionary communications satellite, in resumed and didactic form. Theses techniques, when used in a intregated way, allow a shared efective of the satellite systems resource. In this case, is broached the FM and BPSK transmission techniques, FDM and TDM multiplexation techniques and is done a analysis of the FDMA, TDMA and CDMA access methods. In addition, is analised the randomic access method beyond fix and dinamic allocations.

Palavras-Chave — Sistemas de Satélite, Técnicas de Transmissão, Códigos de Acesso.

Index Tems — Satellite Systems, Transmission Techniques, Access Codes.

I INTRODUÇÃO

Desde seu início, a comunicação por satélite tem sido sinônimo de alta tecnologia e qualidade na transmissão e recepção de informações. Os sistemas voltados ao provimento de serviços através de plataformas espaciais sempre foram considerados complexos, muito embora, fizessem uso de diversas técnicas empregadas nas comunicações terrestres.

A alta tecnologia utilizada nos engenhos espaciais e a inerente limitação de banda de frequências, que é o recurso oferecido pelos satélites para as

comunicações, refletiam-se nos custos desse serviço, levando a uma seletividade de usuários e aplicações. Assim, desenvolver maneiras para o compartilhamento da banda de frequências do satélite, entre os clientes do sistema, era uma forma de se reduzir os custos e tornar o serviço acessível e atraente a uma quantidade maior de usuários.

Com foco nas comunicações por satélites geoestacionários, este artigo está estruturado de forma que primeiro faz-se uma análise básica das técnicas de transmissão analógica e digital. Em seguida, apresenta-se conceitos sobre as técnicas de multiplexação por divisão da frequência e tempo, além dos métodos de acesso. O método de acesso FDMA é apresentado, com uma análise da transmissão SCPC. Este trabalho aborda, então, a técnica TDMA, com considerações sobre os quadros de transmissão. Um exemplo de uso do TDMA em matriz de comutação de bordo no satélite operando com múltiplos feixes de sinal também é apresentado. A seção VI aborda o CDMA e a técnica *spread-spectrum*. Na seção VII é analisada a alocação fixa e sob demanda, com considerações sobre os sisema DAMA e SPADE. A seção VIII trata do acesso randômico usando-se como exemplos as técnicas Aloha Pura e Aloha Discreta.

II TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO

II.1 TRANSMISSÃO ANALÓGICA

Desde seu início, as comunicações por satélite têm usado as transmissões analógicas. Ainda hoje, muitos sistemas por satélite transmitem sinais telefônicos e de televisão usando, por exemplo, a modulação por frequência (FM), associada à técnica de múltiplo acesso por divisão de frequências (FDMA). Embora seja um método antigo, o uso da transmissão analógica deve se manter por algum tempo devido aos grandes investimentos realizados nessa técnica [2].

Entre os diversos tipos de transmissões analógicas, a modulação por frequência é a preferida porque a amplitude da portadora (sinal de alta frequência no qual são impressas as informações do usuário) não é afetada pela informação modulante (informação do usuário) de maneira que o sinal é pouco sensível à eventuais não-linearidades nos canais do satélite [3]. Além disso, a modulação FM é tipicamente utilizada em sistemas que necessitam de elevada relação sinal / ruído (SNR - *signal noise ratio*), como é o caso das transmissões por satélite.

A relação SNR mede quantas vezes o nível de sinal (informação) é maior que o nível de ruído pre-

sente no sinal.

Como qualquer sistema de comunicação, a transmissão por satélite está sujeita a diversos fatores de degradação do sinal. Um deles, o ruído, incide, principalmente, na amplitude do sinal. Assim, os sistemas FM tem maior imunidade a ruídos, pois as informações do sinal modulante estão nas variações de frequência da portadora.

Considerando uma cossenóide como sinal modulante, o sinal modulado em FM pode ser descrito pela expressão:

$$e(t) = E_o \cos(2\pi f_o t + \beta \sin 2\pi f_m t) \quad (1)$$

onde:

E_o = amplitude da portadora;
 f_o = frequência da portadora;
 β = índice de modulação em FM;
 f_m = frequência do sinal modulante.

Sendo que o índice de modulação β em FM é definido como:

$$\beta = \frac{\Delta f_o}{f_m} \quad (2)$$

onde Δf_o é o desvio de frequência. A largura de banda de frequências para o sinal FM é dada pela expressão:

$$B = 2(\Delta f_o + f_m) \quad (3)$$

ou

$$B = 2nf_m \quad (4)$$

com

$$n = \beta + 1 \quad (5)$$

sendo n o número de bandas laterais em cada lado da portadora [4].

A transmissão FM é, efetivamente, uma técnica muito popular na comunicação por satélite, devido à maturidade da tecnologia e da facilidade de implementação. No entanto, utiliza de forma pouco eficiente a energia do satélite e tem baixa flexibilidade para alterações dos circuitos, em especial, quando associada à técnica de múltiplo acesso por divisão de frequências [3].

II.2 TRANSMISSÃO DIGITAL

A transmissão digital passou a ser usada pelas estações terrenas dos sistemas por satélite com o surgimento da eletrônica digital e buscando, também, o aumento da capacidade de comunicação. A transmissão digital possui diversas vantagens em relação à analógica mas pode-se citar como exemplos a possibilidade de integração de vários tipos de informação e a flexibilidade. É possível, com isso, fazer frente a variações de tráfego com rápidas alterações no sistema. Além disso, é melhor adaptada à transmissão de informações em alta velocidade [2].

A modulação, processo de alteração da onda portadora conforme as informações do usuário, é um dos inúmeros exemplos de uso dos sistemas digitais. A modulação digital é, portanto, a técnica usada para transmitir a informação digital em banda básica sobre

a largura de banda dos canais [4]. Na comunicação por satélite, os sistemas de modulação digital mais convencionais são o BPSK (*binary phase shift keying*) e o QPSK (*quaternary phase shift keying*), que são variantes da modulação PSK (*phase shift keying*).

O BPSK é um esquema de sinalização binário [5] onde a fase da portadora analógica varia entre dois valores separados de π radianos para cada novo dado binário. Vista como uma modulação em fase, o sinal $s(t)$ BPSK é dado por:

$$s(t) = E_o \cos[2\pi f_o t + d_k(\pi/2) + \phi] \quad (6)$$

sendo:

ϕ a fase inicial da portadora; d_k conjunto de dados variáveis (números inteiros representando a mensagem).

As escolhas mais comuns para d_k são $d_0 = 0$ e $d_1 = 2$ ou $d_0 = +1$ e $d_1 = -1$.

III TÉCNICAS DE MULTIPLEXAÇÃO

A principal função de um satélite de comunicações é receber um sinal de rádio oriundo da superfície terrestre, amplificá-lo e retransmiti-lo de volta para a Terra. De forma genérica, os equipamentos eletrônicos necessários para se alcançar esse objetivo estão agrupados no *transponder* que é um recurso limitado e de alto custo.

Dessa forma, os sistemas por satélite costumam empregar diversas técnicas que visam melhorar o desempenho no uso do recurso *transponder*. Entre as diversas técnicas empregadas, uma das principais é a multiplexação. A multiplexação consiste em se permitir que vários canais secundários e que, simultaneamente, contenham informação, compartilhem um único canal primário. Essa operação é realizada pelos equipamentos multiplex, na transmissão, e demultiplex, na recepção [6].

Assim, a idéia fundamental nos sistemas multiplex é permitir a otimização da utilização dos meios de transmissão e, no caso dos sistemas por satélite, o meio comum a ser compartilhado corresponde aos *transponders*. Existem diversas técnicas associadas à multiplexação, entre as quais destacam-se a multiplexação por divisão de frequências e a multiplexação por divisão de tempo. Além disso, o processo de multiplexação deu origem ao compartilhamento usado nos métodos de acesso e que também visam otimizar a utilização dos recursos dos satélites.

III.1 A MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DA FREQUÊNCIA

O sistema que opera com a multiplexação no domínio da frequência (FDM *frequency division multiplexing*) foi originalmente sugerido por Carson em 1920 [7]. Basicamente, consiste em se tomar diversos canais com a mesma faixa de frequências e em suportes de transmissão distintos e efetuar sua translação para posições adjacentes e específicas do espectro de frequências de um mesmo meio de

transmissão (por exemplo par metálico, cabo coaxial, fibra ótica ou microondas), sendo agrupados e transmitidos sem interferência mútua.

O sinal transmitido sobre o meio comum de comunicação é conhecido como banda básica. Assim, a banda básica é a faixa de frequências necessária para a transmissão do sinal multiplex por um meio de transmissão qualquer, sendo formada através de sucessivos processos de translação de frequências. Os canais são deslocados no espectro de frequência pelo emprego de ondas portadoras. No lado de recepção, os canais são separados por filtros e convertidos às posições originais do espectro com o uso das mesmas frequências de ondas portadoras da transmissão [6].

Na banda básica, os canais que foram convertidos ocupam faixas adjacentes, para maior economia na ocupação do espectro. No entanto, a faixa útil para o sinal é menor que a largura do canal pois utilizam-se bandas de guarda entre os sinais. Essas bandas de guarda são necessárias porque não se consegue produzir filtros ideais e, na recepção, precisa-se de uma margem de segurança para se evitar interferências entre canais adjacentes [7]. Para se chegar à formação da banda básica no processo FDM é necessário transpor diversos estágios de multiplexação e a largura da banda de guarda irá variar conforme o estágio de translação.

III.2 A MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DO TEMPO

Este é um processo no qual cada estação terrena de um mesmo sistema possui um determinado tempo para transmitir suas informações. O *transponder*, ou parte dele, é compartilhado por todas as estações que o acessam de forma ordenada e sincronizada. Dessa forma, processos devem ser usados para estabelecer e manter o correto sincronismo entre todas as estações participantes do sistema.

No TDM (*time division multiplexing*) há o conceito de intervalos de tempo (*time slots*) e que são divisões contíguas no tempo. Cada um dos *time slots* é reservado para uso de um dos canais (estações terrenas). Dentro de cada canal, utiliza-se as janelas de tempo para a transmissão da informação, dimensionadas conforme a necessidade do sistema. Para a formação da estrutura de transmissão é necessária, além dos diversos intervalos justapostos no tempo, a inserção de tempos de guarda [7] e que têm finalidade semelhante à bandas de guarda do sistema FDM.

No caso do TDM, os tempos de guarda correspondem a intervalos entre a varredura sucessiva de canais adjacentes, não havendo transmissão de informação nesses instantes. No entanto, o seu uso é fundamental pois os sistemas reais possuem resposta limitada em frequência, o que faz com que os pulsos se alarguem no domínio do tempo, transbordem suas respectivas janelas de amostragem e produzam interferência entre canais (a chamada diafonia). Com o emprego do tempo de guarda, há um espaço adequado entre canais contíguos de maneira que a interferência eventualmente causada fique dentro de níveis aceitáveis.

Cada ciclo completo de varredura de todos os canais forma um conjunto de intervalos de tempo chamado de quadro (*frame*). Se a varredura for periódica, os quadros também se sucederão de forma periódica e com a mesma estrutura [7]. Ressalta-se que o sincronismo é aspecto fundamental nesse sistema onde além do sincronismo de frequência (varredura seqüencial das estações do sistema), há a necessidade de coerência de fase no processo de varredura [6].

Normalmente, as amostras dos canais de informação são tomadas de forma uniforme ao longo do tempo, o que corresponde a intervalos de tempo iguais no quadro TDM. O receptor faz coincidir a abertura das janelas do demultiplexador (equipamento de recepção) com as janelas onde o sinal está presente, verificando as transições do sinal de entrada [7].

Embora esse sistema de transmissão possa operar tanto com sinais analógicos como digitais, foi o desenvolvimento do PCM (*pulse code modulation*) [7] que deu grande impulso ao emprego do TDM. No PCM, quaisquer sinais de entrada, inclusive os analógicos, são transformados em sinais digitais, transmitidos para a estação remota, convertidos na forma original e, então, entregues ao usuário.

Quando o canal de entrada possui longos períodos de ociosidade, sem o tráfego de informação, o esquema determinístico de multiplexação perde em eficiência, uma vez que a filosofia intrínseca ao processo é a otimização do uso do meio de transmissão. A adoção de estruturas que usam a multiplexação por divisão de tempo estatística ou probabilística permitem a melhoria do desempenho do sistema. Nesse caso, a idéia básica é somente ocupar um *time slot* quando, efetivamente, o canal contiver informação para ser transmitida, usando os períodos de inatividade para alocar outro canal nesse intervalo de tempo [6].

IV TÉCNICAS DE ACESSO

VI.1 CONCEITOS

Uma das vantagens da comunicação por satélite sobre outros meios de transmissão é a capacidade de se conectar todas as estações terrenas, permitindo conectividade ponto-multiponto. Um *transponder* do satélite pode ser acessado por diversas estações terrenas e, portanto, são necessárias técnicas para a alocação de bandas nesse recurso para cada estação. Além disso, é necessário o gerenciamento sobre cada alocação para, por exemplo, permitir o remanejamento de banda entre estações com pouco e muito tráfego e, também, para evitar a colisão entre alocações das estações. Essa técnica é denominada de múltiplo-acesso sendo que os esquemas mais importantes são: FDMA, TDMA e CDMA [2].

Os métodos de compartilhamento de recursos incluem a alocação dedicada, o acesso randômico, e a alocação sob demanda [8]. Na alocação de canais dedicados, cada usuário ou estação terrena usa um recurso fixo e predeterminado, não importando se a

estação terrena tenha ou não tráfego para ser transmitido. O esquema de alocação dedicada é apropriado para tráfego do tipo contínuo (por exemplo, transmissões de TV), mas pouco econômico para tráfego de rajadas (*bursts*), como aplicações interativas. No caso de canais com acesso randômico, todos os usuários (as estações terrenas) competirão pela transmissão no canal, assim que a informação estiver disponível para tanto. Esse tipo de método é adequado para tráfego de rajadas mas não para tráfego sensível a retardos (*delay-sensitive traffic*), como é o caso das transmissões de voz. O esquema de alocação por demanda reserva recursos conforme solicitado pela estações terrenas. Uma vez que os pedidos de reserva sejam transmitidos (usando acessos dedicados ou randômicos) e processados, as estações podem fazer as transmissões dentro do recurso estabelecido. A alocação sob demanda é adequada para tráfego com taxa variável e em condições híbridas, como o tráfego de multimídia.

IV.2 O FDMA

Na técnica de múltiplo-acesso por divisão de frequência (FDMA – *frequency division multiple access*) o *transponder* do satélite é dividido em diversas bandas de frequências sendo que cada segmento é alocado para um usuário [9]. O número de segmentos pode variar de um (onde um *transponder* inteiro é dedicado a um único usuário) a centenas, como em uma operação SCPC (*single channel per carrier*) típica [10]. Dentro do canal FDMA, a transmissão pode ocorrer de forma contínua. Cada estação terrena da rede de satélite transmite uma ou mais portadoras para o *transponder* do satélite (tanto pode ser empregada a modulação analógica – FM – como a digital – PSK [9]).

Para cada portadora é alocada uma banda específica do *transponder* com uma pequena faixa de guarda para se evitar interferências entre portadoras adjacentes. O *transponder* do satélite recebe todas as portadoras dentro da faixa de frequências de operação, as amplifica, e as retransmite de volta para a Terra [2]. Um exemplo de sistema típico FDMA é mostrado na Figura 1 para o caso de uma rede com três estações terrenas, onde o enlace de radiofrequência que interliga a estação terrena ao satélite, no sentido de transmissão do sinal, é chamado de *uplink* e o enlace que interliga o satélite às estações terrenas, também no sentido de transmissão, é conhecido como *downlink* [11].

O FDMA foi a primeira técnica de múltiplo acesso utilizada pelas comunicações via satélite. Ela é uma tecnologia madura, estável, de fácil implementação, sendo especialmente atraente para o serviço telefônico onde há grande necessidade de disponibilidade de rotas permanentes durante os horários de maior movimento [3].

No projeto desse sistema, especiais considerações devem ser feitas com relação aos *transponders* do satélite, mais especificamente, aos amplificadores de potência. Dependendo do método de modulação empregado, não-linearidades de amplitude ou fase

devem ser consideradas no projeto a fim de se minimizar os produtos de intermodulação, diafonia e outros efeitos de interferência, levando-se em consideração o número e a largura de banda das portadoras que acessarão o *transponder*.

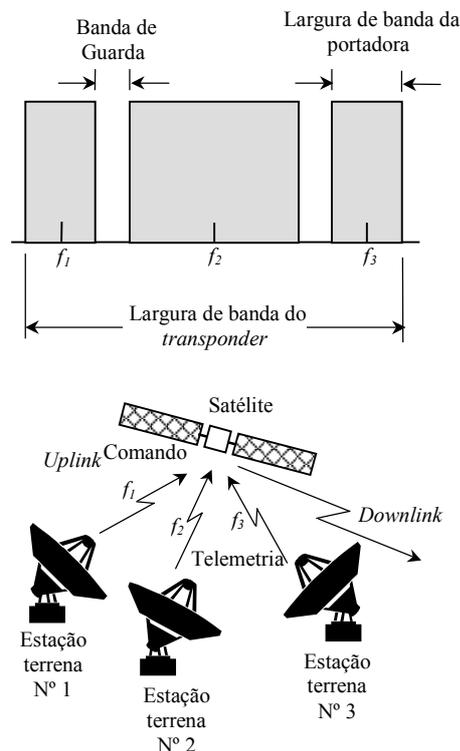


Figura 1 – Conceito do Sistema FDMA

Os amplificadores de potência operam de forma mais eficiente quando são levados a trabalhar perto da região de saturação. No entanto, quando duas ou mais portadoras trabalham perto dessa região, são gerados excessivos produtos de intermodulação. Esse tipo de ruído pode ser minimizado reduzindo-se a potência de transmissão de modo que os amplificadores operem abaixo da região de saturação. A essa operação denomina-se *backoff* [12].

Os produtos de intermodulação podem ser reduzidos pela escolha de valores mínimos de *backoff* necessários para assegurar a operação dentro dos parâmetros preestabelecidos de desempenho. Isto, porém, resulta em uma menor disponibilidade da capacidade do canal quando comparado ao modo de acesso único (uma única portadora). Para cada decibel de *backoff*, os produtos de intermodulação caem cerca de 2 dB para o caso de multiportadoras (mais que três operadoras no *transponder*) [10].

Quando aumenta-se a quantidade de portadoras no *transponder*, a utilização de largura de banda torna-se pouco eficiente. Assim, por exemplo, se for assumido o valor de 100% de eficiência na utilização de um *transponder* com uma única portadora, essa eficiência reduz-se a 90% para 2 portadoras, 60% para quatro, 50% para oito e 40% para catorze [12].

Nos primeiros sistemas de comunicação por satélite, os produtos de intermodulação foram os fatores dominantes que limitavam a operação desses sistemas [10]. No entanto, como amplificadores de alta potência e *transponders* de banda estreita, capazes

de operar com poucas portadoras perto da região de saturação, tornaram-se disponíveis, a capacidade máxima tornou-se dependente da análise de parâmetros como:

- degradações devido ao *transponder*, onde produtos de intermodulação são causados por diafonia e pelas não-linearidades de amplitude e fase devido à conversão modulação em frequência-modulação em amplitude-modulação em fase durante a operação multiportadora;
- degradações na transmissão FM e não diretamente associados ao *transponder*, como a sobreposição de portadoras adjacentes que geram ruído na banda básica;
- degradações gerais, que incluem disponibilidade de energia e alocação de banda, controle de potência do *uplink*, coordenação de frequências e vulnerabilidade geral do sistema à interferências.

Outro parâmetro importante a ser considerado nos sistemas FDMA é a diafonia que pode ser o resultado de dois fenômenos:

- uma resposta em amplitude que varia com a frequência, produzindo modulação em amplitude com a portadora de RF;
- uma modulação em amplitude que modula em fase todas as portadoras que ocupam um mesmo amplificador devido à conversão AM/PM.

Quando uma portadora passa através de um amplificador ela produz modulação em amplitude devido às anomalias no caminho de transmissão. Outra portadora passando através do mesmo amplificador interage com a componente AM dando origem à diafonia. Para aplicações típicas em satélite, os produtos de diafonia devem estar 58 dB [10] abaixo do sinal efetivo.

Outro problema a ser avaliado no sistema FDMA é a emissão RF fora da banda que tem origem no amplificador de alta potência da estação terrena quando operando na região na saturação. São gerados produtos de intermodulação que afetarão, principalmente, as outras portadoras de *uplink*. Para evitar esses problemas, também adota-se a técnica de *backoff* para a operação do amplificador da estação terrena.

O controle de potência do *uplink* é, também, outro importante fator para os sistemas FDM/FM/FDMA. A potência de transmissão deve ser mantida dentro dos níveis adequados para se obter uma relação sinal/ruído satisfatória para a transmissão da informação. Além disso, a potência de *uplink* de cada portadora deve ser tal que limite a geração de produtos de intermodulação com as outras portadoras. Um método utilizado para se ter um controle adequado, é o estudo individual de cada *transponder* para que se possa realizar a configuração apropriada para cada amplificador [10].

Em termos de desempenho de um sistema FDM-FM-FDMA, a relação sinal/ruído de saída de um canal telefônico para uma frequência máxima f_m da banda básica FDM é encontrada considerando-se que a densidade de ruído é N_o e que B é a largura de banda da portadora FM transmitida para a estação terrena

(frequência intermediária). O valor da relação sinal/ruído S/N [2] é dado por:

$$\frac{S}{N} = \frac{E_o^2 f_r^2}{2N_o f_m^2 b} \quad (7)$$

onde:

E_o = amplitude da portadora;

f_r = desvio de frequência para um ponto de referência de 0 dBm dentro do canal;

b = largura de banda do canal telefônico onde o ruído tem maior valor.

Como a potência da portadora para um sistema FM é $C = E_o^2/2$ e a potência efetiva de ruído na banda de FI é $N_e = N_o B$, então, a relação portadora/ruído de um sinal FDM-FM-FDMA na entrada de um demodulador FM será:

$$\frac{C}{N_e} = \frac{E_o^2}{2N_o B} \quad (8)$$

Então, pode-se expressar a relação sinal/ruído de um canal telefônico para a frequência máxima da banda básica FDM em termos da relação portadora/ruído recebida. Substituindo-se a Equação (8) na Equação (7) encontra-se:

$$\frac{S}{N} = \left(\frac{C}{N_e} \right) \left(\frac{B}{b} \right) \left(\frac{f_r}{f_m} \right)^2 \quad (9)$$

e conseqüentemente,

$$\frac{C}{N_e} = \left(\frac{S}{N} \right) \left(\frac{b}{B} \right) \left(\frac{f_m}{f_r} \right)^2 \quad (10)$$

Pela Equação 10, observa-se que a relação portadora/ruído total C/N_e pode ser ajustada para maximizar a capacidade do *transponder* do satélite através do ajuste da largura de banda B da portadora de RF (e, portanto, da quantidade de canais por portadora) e pela seleção adequada da relação sinal/ruído máxima do canal de saída do demodulador FM.

Como mencionado anteriormente, a técnica FDMA tem sido usada em conjunto com a modulação analógica desde o início da comunicação por satélite. As duas principais técnicas FDMA [2] em operação são:

- transmissão MCPC (*multichannel per carrier*) ou múltiplos canais por portadora, onde a banda básica composta por diversos canais telefônicos multiplexados pela técnica de divisão de frequências modula uma portadora de RF e é transmitida para o *transponder* FDMA do satélite. Este tipo de operação é chamada de FDM-FM-FDMA e é um tipo de transmissão típico para aplicações que requeiram enlaces de grande capacidade.
- transmissão SCPC (*single-channel-per carrier*) ou canal único por portadora, onde cada canal telefônico modula uma portadora de RF específica e é transmitido para o *transponder* FDMA do satélite. A modulação pode ser analógica, como o FM, ou digital, como o BPSK.

IV.2.1 A TRANSMISSÃO SCPC

Nesse sistema, cada canal de telefonia é modulado independentemente por uma portadora de RF e é transmitido para o satélite cujo *transponder* opera com tecnologia FDMA. Para modulações com portadora analógica, é empregado o FM; no caso digital, usa-se o PSK (BPSK/QPSK) [10]. Normalmente, é utilizado o sistema FM-SCPC devido à sua simplicidade e baixo custo.

Algumas técnicas são normalmente usadas para se aumentar a eficiência dos sistemas SCPC [3]:

- a) ativação por voz: nesse método, as portadoras somente são transmitidas quando os sinais de voz estão presentes nos circuitos telefônicos, ou seja, nos canais de comunicação. Como, em média, os sinais de voz estão presentes nos circuitos unidirecionais somente cerca de 40% do tempo total de duração de uma chamada telefônica, o número de portadoras que estarão operando de forma simultânea no *transponder* será menor que o total de portadoras disponíveis. Devido a isso, os efeitos dos produtos de intermodulação serão reduzidos, resultando em um aumento da eficiência no uso da potência do satélite.
- b) alocação por demanda: nessa técnica, todos canais podem ser compartilhados por qualquer estação terrena, isto é, uma estação terrena pode estabelecer circuitos de comunicação pelo uso de qualquer canal vago. Quando a estação deseja transmitir, ela faz uma solicitação de reserva de canal. Após o uso, o canal pode ser alocado a outra estação que deseja transmitir. Assim sendo, a eficiência pode ser alcançada pois somente são alocados os canais para as chamadas em andamento em determinado momento.

O projeto de um enlace FM-SCPC [2] também pode ser expresso em termos da relação sinal/ruído S/N de saída de um demodulador FM, ou seja:

$$\frac{S}{N} = \frac{3E_0^2 \Delta f_0^2}{4N_0 f_m^3} \quad (11)$$

ou ainda,

$$\frac{S}{N} = \frac{3}{2} \left(\frac{C}{N_e} \right) \left(\frac{B}{f_m} \right) \left(\frac{\Delta f_0}{f_m} \right)^2 \quad (12)$$

onde $C/N_e = E_0^2/2N_0B$ é a relação portadora/ruído e B é a largura de banda da portadora em FM dada pela Equação 3.

V O TDMA

O *Time Division Multiple Access* foi desenvolvido como um sistema de transmissão que poderia resolver os problemas associados ao sistema FDMA [3]. O sistema INTELSAT foi pioneiro na utilização desse método de múltiplo acesso na comunicação por satélite [17].

Nesta técnica, uma portadora modulada por sinais digitalizados de uma multiplexação por divisão de

tempo é transmitida e recebida por um grupo de estações terrenas através do compartilhamento, baseado no tempo, de um *transponder* do satélite [3]. De forma diferente do FDMA, o TDMA somente opera com transmissão digital [10]. A Figura 2 ilustra a técnica TDMA.

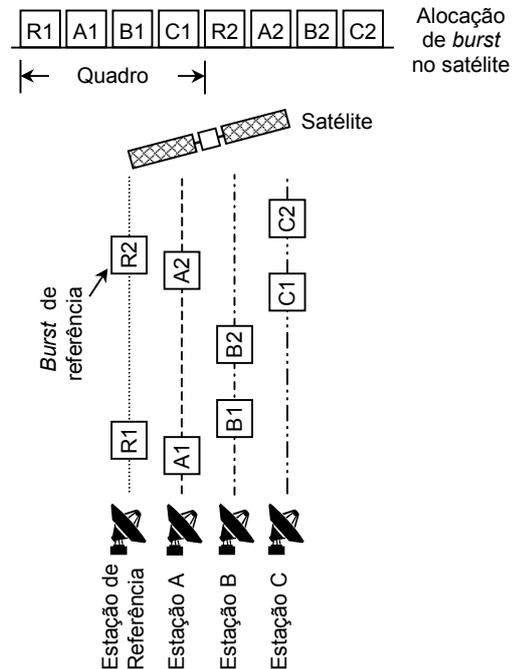


Figura 2: Configuração Básica do Sistema TDMA

Conforme a largura de banda do *transponder* e da modulação usada, a taxa de bits típica encontra-se entre 10 e 200 Mbps. No TDMA de banda larga, a taxa de transmissão na forma de rajadas, *bursts*, encontra-se entre 60 e 250 Mbps usando toda a faixa de frequências do *transponder* e toda energia, resultando em uma eficiência próxima de 95% [17]. Mas as redes com TDMA também podem ser usadas para baixas taxas de dados, tipicamente entre 64 kbps e 15 Mbps compartilhando a capacidade de um *transponder* que opera em FDMA o que reduz a potência de *uplink* solicitada pela estação terrena.

Como somente uma portadora opera no *transponder* em cada instante, não se desenvolve produtos de intermodulação e o amplificador do *transponder* pode operar na sua potência máxima [17]. Dessa forma, não há a necessidade de *backoff* e pode-se operar com máxima eficiência e próximo da região de saturação, se for o caso [1].

Outra vantagem do TDMA é a flexibilidade [10]. Acessos não uniformes não são problemas para essa tecnologia uma vez que a alocação de *time slots* é fácil de ser ajustada. Isto é adequado para configurações iniciais de redes, expansão ou serviços adicionais.

As desvantagens do TDMA são a necessidade de sincronismo e a complexidade do sistema [10]. Não pode haver sobreposição de acesso devido às interferências que serão causadas sobre os acessos seqüenciais. Dessa forma, torna-se necessário estabelecer tempos de guarda [2] entre os acessos de forma a se obter uma mínima eficiência de operação. Em um sistema TDMA típico, 5 a 20 acessos podem

ser acomodados por *transponder* com tempos de guarda entre 50 e 200 ns [10].

Na rede TDMA, os sinais são transmitidos no modo de rajadas (*bursts*). Cada estação terrena transmite periodicamente um ou mais *burst* para o satélite. Assim sendo, o sinal de entrada no *transponder* do satélite consiste em um conjunto de *bursts* originários de diversas estações terrenas. Esse conjunto de *bursts* é chamado de quadro TDMA [2] e é ilustrado na Figura 3, onde T_f é o tempo total de duração do quadro (*frame*).

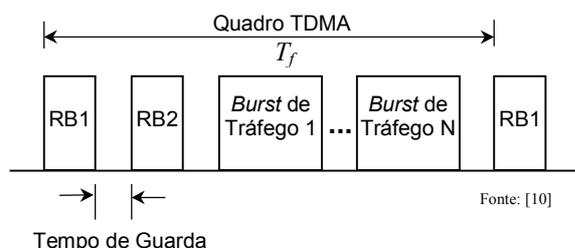


Figura 3: Estrutura do Quadro TDMA

Cada quadro TDMA contém dois *bursts* de referência RB1 e RB2 [10]. O primeiro *burst* de referência, que tanto pode ser um RB1 ou RB2, é transmitido por uma estação terrena de referência primária. Um segundo *burst* de referência, que também pode ser um RB1 ou RB2 (de forma excludente com o primeiro *burst* de referência) é transmitido por uma estação terrena de referência secundária [2] o que proporciona uma comutação automática no caso de falha da estação de referência primária [10]. Isto permite um fornecimento ininterrupto de serviço pela rede. Os *bursts* de referência não levam informação e são utilizados para estabelecer sincronismo entre todas as estações terrenas que estejam acessando um *transponder* em particular [2].

Os *bursts* de tráfego transmitidos pelas estações terrenas carregam a informação digital. Cada estação pode transmitir um ou mais *bursts* de tráfego por quadro TDMA que devem ser posicionados no quadro conforme um mapeamento de tráfego estabelecido entre as estações. A localização do *burst* de tráfego dentro do quadro está relacionado ao primeiro *burst* de referência. Pela localização desse primeiro *burst* de referência, a estação terrena é capaz de localizar um determinado *burst* de tráfego no quadro. O tamanho do *burst* de tráfego depende do volume de informações contida na portadora [2].

Há a necessidade de se estabelecer um pequeno tempo de guarda entre *bursts* originários de diferentes estações para se evitar a sobreposição de acessos no *transponder*. O tempo de guarda é, normalmente, igual ao intervalo usado para detectar o pulso de *start* de um quadro TDMA por uma estação terrena.

O tamanho de um quadro TDMA típico encontra-se entre 0,75 e 20 ms [2] para o serviço de voz sendo, geralmente, múltiplo de 0,125 ms devido à taxa de amostragem PCM que retira 8000 amostras do canal de voz típico (banda de 4 kHz) em um segundo [7].

V.1 A ESTRUTURA DO BURST TDMA [2]

A Figura 4 ilustra os *burst* de tráfego e de referência. No *burst* de tráfego, os bits de informação são precedidos por um grupo de bits que formam o preâmbulo e que é usado para sincronização do *burst*, além de conter informações de gerenciamento e controle. Em geral, o preâmbulo consiste de três partes contíguas:

- a) a seqüência de recuperação de sincronismo e portadora;
- b) a palavra única; e
- c) canal de sinalização.

A seqüência de recuperação de sincronismo e portadora é um conjunto de bits ou símbolos usados pelo demodulador das estações terrenas para recuperar a fase da portadora e regenerar o sinal de *clock* (sincronismo) que serão usados no processo de modulação.

A palavra única no *burst* de tráfego, que é uma seqüência binária apropriada, marca o tempo de ocorrência desse *burst* e fornece a temporização de recepção de quadro que permite à estação extrair somente os *subbursts* procurados

O canal de sinalização para o *burst* de tráfego, é formado pelos *subbursts*:

- a) canal de manutenção, onde instruções na forma de voz ou dados são levadas de/para as estações terrenas;
- b) canal de serviço, que leva informação de *status* das estações para as estações de referência ou informações de alarmes e taxa de erros para outras estações de tráfego; e
- c) *subburst* de tráfego, que ocorre imediatamente após o preâmbulo e contém a informação do usuário (podem ser sinais de voz, dados, vídeo ou facsimile). O tamanho desse *subburst* está diretamente relacionado com a velocidade de transmissão digital do sinal.

Já o *burst* de referência possui somente o preâmbulo, ou seja, não há tráfego de dados. A seqüência de recuperação de sincronismo e portadora tem a mesma função do *burst* de tráfego. A palavra única é utilizada no *burst* de referência para fornecer a temporização de recepção de quadro, o que permite com que uma estação terrena localize a posição de um *burst* no quadro. O canal de sinalização, no caso do *burst* de referência, é composto pelos *subbursts*: canal de manutenção, com a mesma função do *burst* de tráfego; canal de gerenciamento, no qual as estações de referência fornecem instruções de gerenciamento para todas as estações terrenas (como o mapeamento que coordena o tráfego entre estações); e o canal de temporização de transmissão, que leva informação de sincronismo para o ajuste dos *bursts* de temporização de transmissão de maneira que os *bursts* possam ser transmitidos dentro dos *time slots* corretos no quadro TDMA.

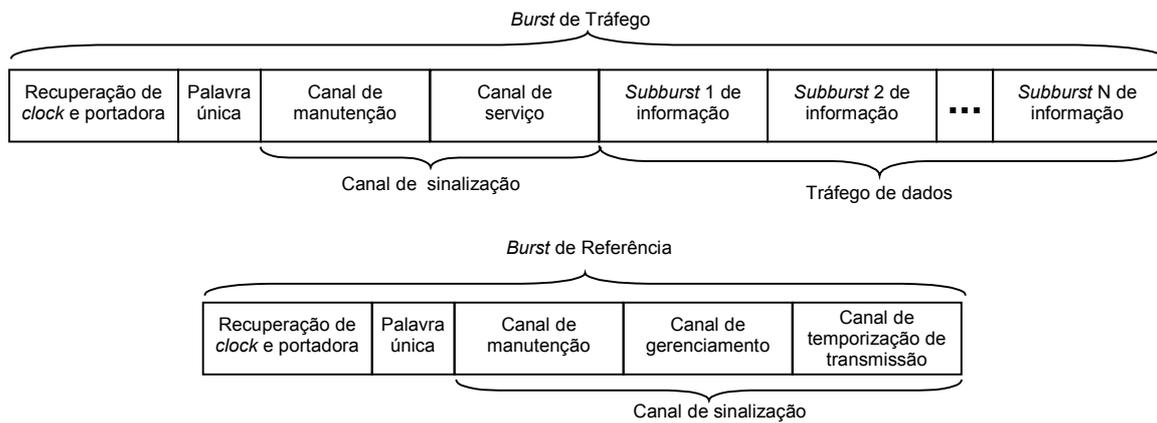


Figura 4: Estrutura do BURTS TDMA

5.2 A EFICIÊNCIA DO QUADRO TDMA [2]

A eficiência do quadro TDMA depende da porcentagem do tempo total T_f do quadro que é alocado para o tráfego de dados, de maneira que, quanto maior a porcentagem, maior é a eficiência do sistema. Para que isso ocorra, o *overhead* do quadro (tempos de guarda e preâmbulo) deve ser reduzido ao máximo, garantindo, porém, que tenham o tamanho suficiente para permitir a operação do sistema dentro da qualidade exigida. A eficiência do quadro TDMA é definida como:

$$\eta = 1 - \frac{T_x}{T_f} \tag{13}$$

onde T_x é o *overhead* do quadro. Se houverem n *bursts* em um quadro, então T_x será expresso por:

$$T_x = nT_g + \sum_{i=0}^n T_{p,i} \tag{14}$$

onde T_g é o tempo de guarda entre *bursts* e $T_{p,i}$ é o preâmbulo do i -ésimo *burst*.

V.3 A CAPACIDADE DO CANAL TDMA [10]

Os sistemas de comunicação por satélite possuem limitação de banda de frequências ou limitação de potência.

Para o caso de limitação de largura de banda, a capacidade nominal de um *transponder* do satélite utilizando a técnica TDMA é expressa por:

$$R_b = W + B_s - C_w \tag{15}$$

onde:

- R_b = taxa de bits do enlace, expressa em dB;
- W = largura de banda do *transponder* do satélite, em dB (por exemplo, 100 bps equivale a 20 dB);
- B_s = taxa de bits por símbolo (dB) e indica o número de bits contido em um símbolo da portadora ou baud (por exemplo, na modulação QPSK, um baud leva dois bits de informação);
- C_w = relação largura de banda / taxa possível de símbolos (para o *transponder*, é expressa em dB, com valor típico 0,8 dB).

Se o canal do satélite é limitado em potência no *downlink*, então a capacidade é expressa por:

$$R_p = EIRP_{dBW} - P_L + \frac{G}{T} - k - \frac{E_b}{N_0} - M \tag{16}$$

onde:

- R_p = taxa de bit do enlace de transmissão do satélite em dB;
- $EIRP$ = potência isotrópica radiada efetiva do *transponder* (dBW);
- P_L = perda de trajeto do *downlink* (dB);
- $k = -228,6$ dBW / Hz / K é a constante de Boltzmann;
- E_b/N_0 = valor da taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*) desejada;
- M = margem de enlace total do sistema (dB);
- G/T = relação do ganho e temperatura de ruído da estação terrena.

V.4 O SUPERQUADRO [2]

As funções mais críticas em um quadro TDMA são o controle da posição do *burst* no quadro e a coordenação do tráfego entre estações, que são atendidas pela ação da estação de referência que deve endereçar todas as estações da rede. A coordenação do tráfego entre estações é conseguida através do canal de gerenciamento do *burst* de referência. O controle da posição do *burst* é obtido via o canal de temporização de transmissão.

Se houverem N estações na rede, então serão necessárias N mensagens enviadas através de cada um dos canais. Para se obter uma transmissão livre de erros, em cada canal é empregado um algoritmo de redundância, como a codificação 8:1. Nesse método, um bit de informação é repetido oito vezes conforme um padrão predeterminado o que resulta em uma comunicação mais confiável; porém, aumenta o preâmbulo e, conseqüentemente, reduz a eficiência do quadro.

Objetivando, então, reduzir o tamanho dos preâmbulos dos *bursts* e, assim, aumentar a eficiência, a estação de referência pode, em vez de endereçar as N estações de uma só vez, fazer o endereçamento de cada uma das estações em um quadro diferente de forma que a N -ésima estação seja endereçada no quadro de número N . Assim, esses N quadros podem ser agrupados em uma única unidade chamada de superquadro como mostra a Figura 5.

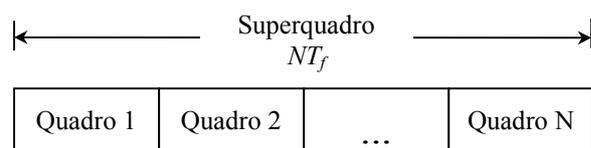


Figura 5: Estrutura do Quadro TDMA

V.5 QUADROS DE AQUISIÇÃO E SINCRONIZAÇÃO

No sistema TDMA, a estação terrena deve desempenhar duas funções:

- a) na recepção, deve ser capaz de receber *bursts* de tráfego endereçados a ela em cada quadro transmitido pelo satélite;
- b) na transmissão, deve transmitir *bursts* de tráfego para as outras estações em cada quadro, sem sobreposição com os *bursts* de outras estações.

Por definição [2], a temporização do quadro recebido (RFT – *receive frame timing*) é o instante de ocorrência do último bit ou símbolo da palavra única do *burst* de referência primário. Também, o último bit ou símbolo da palavra única do *burst* de tráfego é a temporização do *burst* de recepção (RBT – *receive burst timing*). O RFT indica o início de um quadro recebido. A posição de um *burst* de tráfego no quadro recebido é determinada pelo deslocamento entre RFT e o RBT. Esse deslocamento (dado em bits ou símbolos) faz parte de um mapeamento de tempo de *bursts* recebidos que é armazenado na estação terrena. Usando esse mapeamento, a estação terrena pode localizar qualquer *burst* de tráfego no quadro que foi recebido.

Para a transmissão de um *burst* de tráfego de forma que ele possa ser corretamente alocado no quadro do *transponder*, a estação transmissora deve estabelecer uma temporização do quadro de transmissão (TFT – *transmit frame timing*), que indica o início do quadro de transmissão da estação, e uma temporização do *burst* de transmissão (TBT – *transmit burst timing*) que indica o início da transmissão de um *burst* para o satélite. A posição do *burst* transmitido no quadro transmitido é determinado pelo deslocamento entre TFT e TBT, cujo deslocamento faz parte de um mapeamento de tempo de *bursts* transmitidos que é armazenado na estação terrena.

O *burst* de tráfego transmitido, em relação à sua temporização de quadro de transmissão, cairá na posição adequada do quadro TDMA no *transponder*. Isso ocorre para quaisquer *bursts* de quaisquer estações de maneira que, seguindo essa regra, não ocorrerá sobreposições.

O processo de aquisição da temporização do quadro de recepção é chamado de aquisição do quadro de recepção (RFA – *receive frame acquisition*); para a temporização do quadro de transmissão, chama-se aquisição do quadro de transmissão (TFA – *transmit frame acquisition*). Os processos de manutenção dessas temporizações são chamados de sincronização do quadro de recepção (RFS – *receive frame synchronization*) e sincronização do quadro de trans-

missão (TFS – *transmit frame synchronization*).

O processo de aquisição é necessário quando a estação terrena entra ou reentra em operação. Após o término, com sucesso, do processo de aquisição, as estações terrenas entram na fase de sincronização [10]. O processo de sincronização é necessário porque o satélite não está, efetivamente, parado em órbita. Mesmo um satélite geostacionário sofre pequenas perturbações que resultarão em um movimento do satélite. O deslocamento do satélite, mesmo que pequeno, fará com que a distância de *up-link* varie o que impõe uma variação no retardo do sinal entre a estação terrena e o satélite. Essa variação do retardo causa erros no posicionamento dos *bursts* quando eles chegam no *transponder* do satélite. Dessa forma, a sincronização é necessária para manter a correta recepção e transmissão de *bursts* de tráfego [3].

V.6 O SATELLITE SWITCHED TDMA

Na operação de um satélite de comunicação com múltiplos feixes de sinal, uma mesma banda de frequência é usada simultaneamente para todos os feixes. Para esse tipo de satélite, torna-se necessário ter um dispositivo a bordo que efetue algum tipo de comutação para rotear o tráfego oriundo de um feixe para outro [3]. Em um sistema FM-FDMA, é comum o uso de uma matriz estática de comutação para realizar a conexão interfeixe. Uma vez estabelecida a conexão entre dois feixes, o *transponder* em questão somente é ocupado pelo tráfego gerado pela estações terrenas que necessitam dessa conexão. Dessa forma, qualquer outro tráfego que esteja compartilhando o *transponder* nesse momento deve ser roteado para outro *transponder*. Como a quantidade de *slots* de frequências nos *transponders* é limitada, algumas conexões de feixes serão abandonadas quando o número de feixes extrapolar a quantidade de slots disponíveis. Isso ocorre porque um arranjo de conexão estática um-para-um é adotada na transmissão FM-FDMA.

Os sistemas de comutação que podem ser incorporados ao TDMA resolvem os problemas descritos acima. O TDMA pode utilizar matrizes dinâmicas com alta velocidade de comutação a bordo do satélite, ao invés das matrizes estáticas do FM-FDMA. Nesse sistema, chamado de TDMA comutado no satélite (SS-TDMA – *satellite switched TDMA*) [3], o estados das conexões de entrada e saída do comutador dinâmico alteram-se automaticamente conforme uma seqüência de comutação preestabelecida a qual repete-se a cada quadro TDMA.

A comutação pode ser feita para o sinal de RF ou banda básica [1]. No caso da comutação em RF, os sinais de *up-link* e *down-link* são interconectados através de uma matriz de comutação de microondas (MSM – *microwave switching matrix*), como mostra a Figura 6. Nesse exemplo, é mostrado um diagrama de blocos de um sistema SS-TDMA MSM 6x6 onde cada estação terrena transmite seu próprio *burst* de sincronização com o tempo no qual deseja estabelecer um determinada conexão.

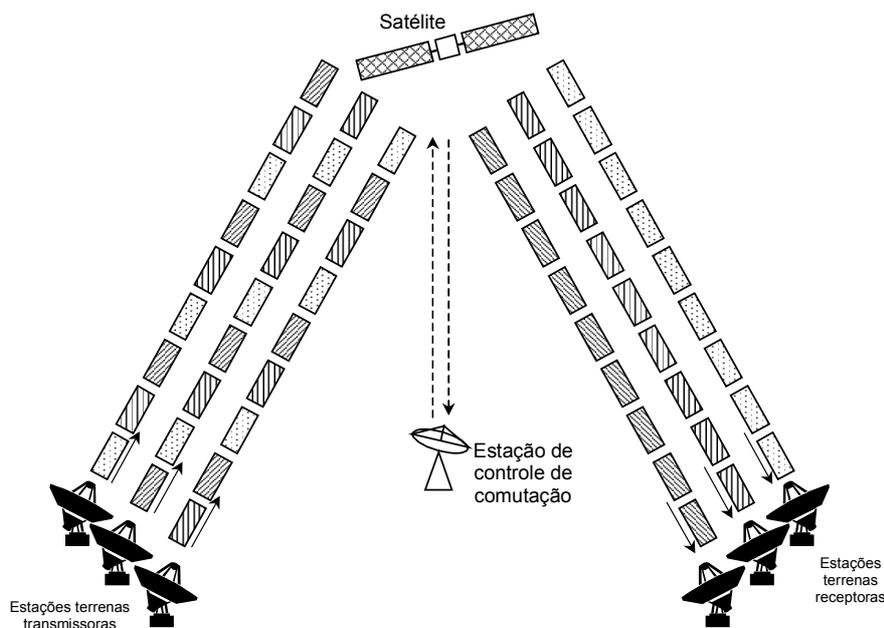


Figura 6: Conceito Básico do Sistema SS-TDMA

Uma vez que o SS-TDMA permite uma conexão, baseada no tempo, entre quaisquer feixes, a eficiência na utilização do *transponder* pode ser maximizada pela adoção de uma seqüência de comutação adequada para o padrão de tráfego.

Na operação do SS-TDMA, torna-se necessário, em primeiro lugar, conhecer o tempo de chaveamento do comutador de bordo que é, efetivamente, o ponto de maior diferença para o TDMA convencional [3].

As estações terrenas devem estabelecer um quadro de sincronização pelo ajuste da temporização de transmissão de seus *bursts* de forma que os *bursts* passem através da matriz de comutação no tempo exato e previamente determinado.

Dois métodos são disponíveis para a sincronização do quadro [3]:

- a) A matriz de comutação de bordo opera livremente, ou seja, com sua própria referência, e todas as estações terrenas se sincronizam com o comutador de bordo;
- b) A matriz de comutação é controlada por uma estação terrena de referência, além de controlar todas as outras estações.

VI O CDMA

A técnica de múltiplo-acesso por divisão de código (CDMA – *code division multiple access*) é particularmente atraente para aplicações militares devido à sua inerente imunidade a ruídos e propriedades de baixa probabilidade de interceptação [10]. Mais recentemente, porém, com o incremento do uso da tecnologia de satélites de média e baixa órbitas, o CDMA têm sido uma das técnicas utilizadas para permitir o múltiplo-acesso, em especial, aos sistemas de comunicação pessoal (*global personal communications*).

Nesse método, o sinal transmitido é espalhado por toda a largura de banda disponível no *transponder* do satélite, em uma interação tempo-freqüência, e usando uma transformação por código. Tipicamente, a largura de banda do sinal RF modulado é de dez a cem vezes maior que a largura de banda da informação. No conceito do CDMA para satélite de baixa órbita (LEO), que é baseado na estrutura do CDMA terrestre [13], cada estação é distinguida de todas as outras pela posse de um código único no qual imprime sua transmissão. Para sua implementação, a técnica CDMA utiliza o sistema de banda larga *spread-spectrum* (espalhamento espectral).

VI.1 A TÉCNICA SPREAD-SPECTRUM

Na tecnologia *spread-spectrum*, ao invés de se separar as transmissões em canais distintos, ocorre a junção ou empilhamento de todas as transmissões sobre um mesmo canal, ou seja, ao invés de se evitar as interferências, elas são propositadamente provocadas. Nos outros métodos de acesso múltiplo, desejava-se canais de banda estreita; nesta tecnologia, utiliza-se canais de banda larga. Quando a potência do sinal é espalhada sobre uma larga banda de freqüências, a potência média do sinal é muito baixa para qualquer *slot* de banda estreita dentro da banda considerada. Isto significa que o sistema *spread spectrum* pode compartilhar uma banda de freqüências com diversos sistemas de banda estreita. Significa, também, que é difícil detectar-se a presença de um sinal *spread spectrum* usando-se equipamentos de banda estreita [5].

A transmissão se dá ao nível de ruído o que torna esse sistema altamente robusto. Um sistema *spread spectrum* adequadamente projetado pode operar com confiabilidade na presença de vários tipos de interferências de radiofreqüências, incluindo

interferências de múltiplos caminhos, interferências de múltiplos acessos e interferências hostis [5]. Não há uma limitação fixa da quantidade de canais simultâneos que podem ser transmitidos, mas sim uma degradação no sistema conforme o aumento do tráfego. O espalhamento do espectro da portadora pode ser feito de diversas formas, incluindo a seqüência direta (DS – *direct sequence spreading*) e salto de freqüência (FH – *frequency hopping*) [5].

A idéia no sistema DS [14] é juntar dois sinais digitais (dois fluxos de dados) com objetivo de se criar um terceiro fluxo de dados que será transmitido. O primeiro sinal é a informação com uma baixa taxa de bits, como, por exemplo, a saída de um circuito digitalizado de voz (cerca de 10 kHz, por exemplo). O segundo sinal é produzido por um gerador de seqüência randômica de maneira que seja um grande fluxo aleatório de bits. Quando os dois sinais são agrupados, o resultado é o terceiro sinal que se deseja transmitir e que possui a mesma taxa de bits do segundo sinal mas contendo a informação do primeiro sinal. Esta situação é ilustrada na Figura 7 [14].

No receptor, outro gerador produz um fluxo de bits randômico que é exatamente igual à seqüência randômica usada no transmissor. A subtração dessa seqüência do sinal recebido fornecerá o sinal de informação. Como o sinal transmitido tem uma alta taxa de bits, por exemplo 100 Mbps, que deverá ocupar uma faixa em torno de 100 MHz, pode-se dizer que ocorreu o espalhamento espectral do sinal de informação. O sinal *spread-spectrum* DS ocupa toda a largura de banda durante todo o tempo, sendo possível que diversos transmissores ocupem o mesmo canal simultaneamente. Com o aumento do número de transmissores sob uma mesma banda, o nível de interferência aumenta gradualmente, o que reduz a eficiência do sistema.

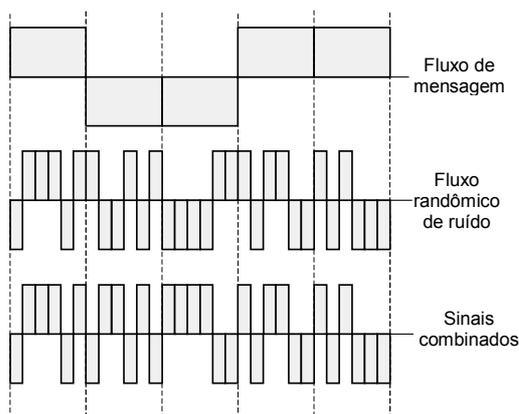


Figura 7: Exemplo do DS – (*direct sequence spreading*)

A filosofia associada à técnica FH [14] consiste na divisão de uma banda larga de freqüências (em geral, na faixa de Megahertz) em inúmeros canais de banda estreita. O transmissor salta de um canal para outro, transmitindo diversas rajadas de informação em cada um dos canais. A seqüência de salto é totalmente randômica, gerada conforme uma chave preestabelecida disponível tanto no transmissor como no receptor. Dessa forma, avaliando a transmissão dentro do período de um segundo, a transmissão da

informação estará ocupando toda a largura de banda, embora, em um dado momento e para uma determinada rajada, esteja ocupando apenas um canal.

Apesar da potência de ruído no canal de banda larga ser alta, seu espectro está espalhado sobre toda a faixa do canal e a energia do ruído em qualquer um dos canais de banda estreita oriundos da divisão do canal de banda larga será menor que a potência da rajada do sinal de informação [14]. Se o número de canais de banda estreita criados dentro do canal de banda larga é grande o suficiente, diversas comunicações simultâneas podem ocorrer pois as chances de colisão na seleção de um mesmo canal por dois ou mais transmissores serão pequenas. Essas chances de colisão podem ser reduzidas através do uso de seqüências randômicas de salto que sejam ortogonais ou totalmente sem relação. Com o aumento de transmissões simultâneas, cada transmissão com sua própria seqüência ortogonal de saltos, o nível de interferências no sistemas aumentará e, assim como no caso do sistema DS, não há um número fixo máximo de transmissões simultâneas que possam compartilhar o canal FH, mas será a eficiência desejada do sistema que imporá os limites. Embora haja outras técnicas que também são usadas para realizar o efeito de espalhamento de freqüências, todas, incluindo as relacionadas acima, tem algumas características em comum [14]:

- A largura de banda para a transmissão da informação é muito maior daquela que seria necessária para a mesma transmissão em um sistema convencional (rádio, por exemplo);
- Ocorre a codificação da informação através de uma seqüência randômica que é compartilhada tanto pelo transmissor como pelo receptor;
- A alocação de seqüências randômicas distintas para estações diferentes.

O Quadro 1 traz uma comparação entre os três métodos de múltiplo-acesso, considerando suas características principais que os distinguem entre si, algumas vantagens e desvantagens.

VII A ALOCAÇÃO FIXA E SOB DEMANDA

Nos três métodos básicos descritos, a cada portadora é alocada uma parcela dos recursos oferecidos pelo satélite: no FDMA, uma banda de freqüências, no TDMA, um *time slot*, e no CDMA uma parcela da potência total com uma transformação por código. O processo efetivo de se dispor do recurso pode ser feito de duas formas básicas: a alocação fixa e a alocação sob demanda [11].

No processo de alocação fixa, os recursos disponibilizados para cada estação são determinados e independentes da demanda de tráfego das redes terrestres nos quais o sistema de satélite está conectado. Caso uma estação terrestre receba um fluxo de informações maior do que a capacidade de transmissão negociada com o satélite, haverá perda de informações pois o excesso não poderá ser transmitido; ou seja, haverá bloqueio de parte da

QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS DOS ESQUEMAS DE MÚLTIPLO-ACESSO			
Tipo	Características	Vantagens	Desvantagens
FDMA	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Modulação analógica ou digital ◆ Separação dos canais por filtragem 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Fácil interconexão com os sistemas analógicos terrestres ◆ Não há necessidade de sincronização ◆ Estações terrenas com equipamentos simples 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Redução da capacidade devido ao ruído de intermodulação (não linearidade dos amplificadores) ◆ Necessita de <i>backoff</i> ◆ Há necessidade de coordenação de potência de <i>uplink</i> ◆ Dificuldades para reconfiguração do plano de tráfego
TDMA	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Modulação digital ◆ Tráfego de <i>bursts</i> entre estações terrenas, sem sobreposição ◆ Apenas um <i>burst</i> presente no sistema, em um determinado momento ◆ Separação por tempo 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Fácil interconexão com as estações terrenas digitais ◆ Amplificadores operam perto da região de saturação, com alta eficiência ◆ Alta capacidade de comunicação ◆ Não necessita de controle de potência e coordenação ◆ Plano de tráfego flexível 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Há necessidade de coordenação de sincronismo ◆ Estações terrenas com equipamentos mais complexos ◆ Necessita de conversão analógica/digital e digital/analógica
CDMA	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Modulação digital ◆ Cada acesso usa toda a largura de banda do <i>transponder</i> ◆ Separação correlacional 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ A técnica <i>spread-spectrum</i> fornece proteção contra interferências 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Há necessidade de sincronismo ◆ A capacidade de comunicação é limitada ◆ A qualidade de sinal piora com o aumento dos acessos ◆ Há necessidade de coordenação de potência ◆ Necessita de conversão analógica/digital e digital/analógica

Fonte: [1]

informação. Mesmo que outras estações terrestres, que façam parte do mesmo sistema, tenham capacidade ociosa de transmissão, essa capacidade não pode ser transferida para a estação que está recebendo sobrecarga de tráfego [11]. Dessa maneira, percebe-se que o recurso disponibilizado pela rede de satélite é explorado de forma ineficiente. É um método usado, em particular, para aplicações onde há um fluxo contínuo de comunicação, como no caso de programas de televisão e radiodifusão comercial [12].

Em contraste com alocação fixa, a alocação sob demanda permite a seleção de recursos da rede de satélite conforme as necessidades de tráfego das estações terrenas em determinado momento [11]. Na alocação sob demanda, para as três tecnologias de múltiplo-acesso discutidas anteriormente, são

estabelecidos métodos e parâmetros de forma que cada estação reserve o recurso necessário para dar vazão ao tráfego necessário em determinado momento. As estações que momentaneamente estejam sem tráfego, não utilizam nenhum recurso liberando-os para aquelas que estejam efetivamente transmitindo informações. Pode-se dizer, então, que ocorre uma transferência de recurso das estações com baixo tráfego para as estações com alto volume de tráfego. Com a alocação sob demanda FDMA e CDMA, uma determinada capacidade é alocada sob requisição para uma certa estação terrena pela sinalização de que a estação necessita da utilização, durante a transmissão, de uma banda de frequências ou um determinado código.

Efetivamente, porém, a alocação sob demanda TDMA é o processo que permite maior flexibilidade. A alocação sob demanda é obtida pelo ajuste do tamanho e posição de *bursts*, necessitando, portanto, de um ajuste no mapeamento do tempo dos *bursts*. Observa-se, portanto, que a alocação sob demanda é ideal para sistemas que operam com tráfego em que o fluxo de informações varie várias vezes durante o dia, havendo momentos de pico e momentos de inatividade na transmissão [12].

VII.1 O SISTEMA DAMA

No sistema DAMA (*demand assignment multiple access*) ou múltiplo acesso por alocação sob demanda, a função mais importante é alocar a capacidade necessária para estabelecer uma comunicação entre dois usuários. O sistema DAMA é o serviço com a melhor relação custo benefício para usuários altamente dispersos e com baixo volume com tráfego [15]. Normalmente, o dimensionamento de rotas de satélites com pré-alocação para um determinado tipo de serviço leva a uma pobre utilização dos equipamentos da rede, dos canais de satélite e dos entroncamentos terrestres. Com o uso do sistema DAMA nas rotas de satélite, pode-se ter ganhos tanto no segmento espacial como nos equipamentos terminais de tráfego. Esse ganho, obtido pelo uso da estrutura DAMA, é baseado nos mesmos princípios de engenharia de tráfego que são aplicados à concentração de linhas e entroncamentos de assinantes das redes de telefonia.

O sistema DAMA tanto pode ser empregado junto ao TDMA como ao FDMA [2]. Quando utiliza o SCPC como base o sistema pode fornecer flexibilidade a ambientes heterogêneos de satélite, com estações terrenas usando antenas com diversos diâmetros. Em princípio, e sujeito ao tipo de satélite, feixe de sinal, transponder e carga de tráfego, o sistema DAMA pode ser operado com antenas com diâmetro inferiores a 1,8 m. Nesse, caso usa-se uma configuração em estrela e estações terrenas com grandes antenas exercem a função de nó centralizador da rede e do tráfego [15].

O sistema DAMA pode estabelecer conexões entre usuários pelo uso de dois métodos básicos: o controle centralizado e o controle distribuído [2].

No sistema DAMA com controle centralizado, há uma estação de controle principal que assume a função de disponibilizar o circuito duplex (dois canais) para que o tráfego entre duas estações terrenas possa ser efetivado. São funções da estação de controle principal: detectar a solicitação de conexão feita por qualquer estação terrena, fazer reserva de recursos para estabelecer a comunicação, determinar os canais nos quais a comunicação vai trafegar, determinar o momento de início da comunicação entre estações, desativar o recurso utilizado pelas estações após a troca de mensagens. A Figura 8 ilustra as rotas para o estabelecimento de comunicação entre duas estações.

O método centralizado tem como vantagem característica a manutenção do *status* de todo o

sistema. Além disso, os recursos de processamento disponibilizados para cada estação são reduzidos. Como desvantagens, há a possibilidade de paralisação de toda rede caso a estação principal falhe (se não houver estação *backup*), o canal pelo qual as estações realizam a solicitação de recurso deve ter uma alta capacidade de tráfego e deve ser implementado um canal de comunicação entre a estação de controle e as demais estações para a alocação da capacidade solicitada.

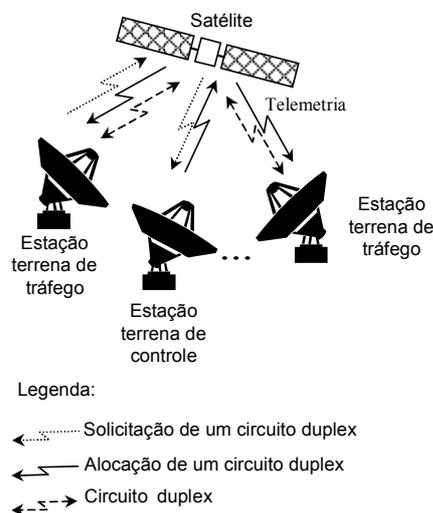


Figura 8: Sistema Dama de Controle Centralizado

No sistema DAMA de controle distribuído não há uma estação de controle central, mas todas as estações da rede assumem igual controle sobre o *status* do uso dos canais, de maneira que cada estação terrena possa alocar canais de forma independente. Dessa maneira, uma vantagem desse sistema é que a falha de qualquer estação não compromete significativamente toda a

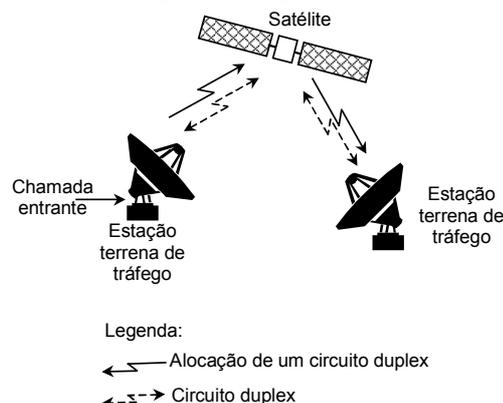


Figura 9: Sistema Dama de Controle Distribuído

rede. Para que seja possível estabelecer o controle distribuído, é configurado um canal de sinalização comum (CSC – *common signaling channel*). Através desse canal as estações trocam informações para atualizar constantemente uma tabela de alocação de circuito baseada na indicação “ocioso-ocupado”, cujo controle da tabela é feita via o sistema DASS (*demand assignment signaling and switching* – sinalização e comutação de alocação sob demanda).

A desvantagem desse sistema consiste na grande capacidade de processamento que cada estação terrena deve ter para manter sempre atualizada e sincronizada

a tabela de alocação de circuito. A Figura 9 ilustra o processo do controle DAMA distribuído.

VII.2 O SISTEMA SPADE

O SPADE (*single-channel-per-carrier pulse code modulation multiple access demand assignment equipment*), ou equipamento de acesso múltiplo PCM-SCPC por alocação sob demanda, é uma rede de satélite SCPC-DAMA, operando com um método de controle distribuído [2].

A técnica PCM é usada para digitalizar os circuitos de voz, a portadora é modulada usando o esquema QPSK e cada canal ocupa uma banda de 45 kHz; já o canal de sinalização comum ocupa 160 kHz da banda de RF e é modulado usando PSK [2]. O acesso das estações se dá através do modo TDMA de maneira que cada estação em operação transmite um breve *burst* de dados com informações de sinalização em cada quadro; esses *bursts* são recebidos pelo satélite e retransmitidos para todas as estações em *broadcast* (difusão). Assim, enquanto cada estação transmite um pequeno *burst* de informação de sinalização, recebe informações de todas as outras. O quadro TDMA do CSC possui um tamanho de 50 ms e usa 128 kbps. Cada quadro tem 50 *time slots* de 1 ms sendo um destinado para *burst* de referência (sincronização da rede) e o *time slot* subsequente para testes. Dessa forma, os 48 *time slots* restantes podem ser utilizados para a acomodação dos *burst* com dados de informações de sinalização pelas estações terrenas da rede [2].

VIII TÉCNICAS DE ACESSO RANDÔMICO.

VIII.1 O ACESSO RANDÔMICO

Para tráfego contínuo de informação os métodos de acesso FDMA, TDMA e CDMA são, efetivamente, os mais adequados. No entanto, em situações onde o número de estações terrenas é grande, a transmissão das estações ocorre no formato de rajadas e há u, esses métodos de acessos tornam-se pouco eficientes. Nesse caso, o método de acesso randômico, que é uma técnica de divisão do tempo com transmissão aleatória, é mais adequado [11].

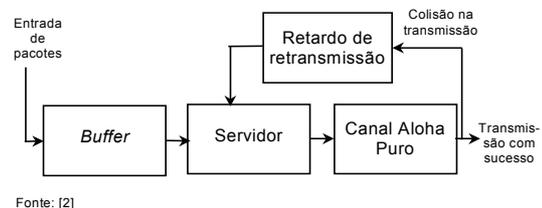
Como exemplos do método de acesso randômico, serão abordadas as técnicas Aloha Pura e Discreta. A avaliação de desempenho dessas técnicas e normalmente feita em função do *throughput* e do retardo médio de transmissão.

VIII.2 A TÉCNICA ALOHA PURA

O protocolo Aloha é um esquema de acesso randômico desenvolvido pela Universidade do Hawaii para interconexão de terminais e computadores via rádio e satélites e que formou a rede conhecida por Alohanet. A idéia era o desenvolvimento de um protocolo que operasse com tráfego de rajadas e onde as estações permanecessem ociosas na maior parte do tempo; nessas condições, o esquema TDMA puro não

era considerado adequado. Essa técnica caracteriza-se [16] pelo fato das estações terrenas transmitirem suas mensagens (ou pacotes) sem nenhuma restrição quanto ao tempo de emissão das mesmas. O método de detecção de conflito consiste simplesmente na existência ou não de resposta da estação destinatária da mensagem. As mensagens são transmitidas na forma de quadros que contém um campo de controle de erros. A estação destinatária responde à estação transmissora somente se não houver erros na mensagem; caso mensagens oriundas de diferentes estações se sobreponham no canal do satélite (conhecido como colisão de pacotes), a estação receptora rejeita o quadro uma vez que ele estará comprometido devido à colisão com a mensagem de outra estação. A estação transmissora aguarda por um determinado tempo pela recepção da resposta da estação destinatária; não recebendo a confirmação, a estação retransmite a mensagem e assim de forma sucessiva até obter uma resposta positiva da estação destinatária. Para se evitar sucessivas colisões, o intervalo de retransmissão da informação é randomizado em cada estação. O protocolo Aloha é mostrado esquematicamente na Figura 10.

A média de retardo de pacotes pelo *throughput* do canal do satélite (quantidade total de informação processada com sucesso pelo canal), característica fundamental de um método de acesso de pacotes, pode ser obtida considerando-se uma grande quantidade de estações (infinita) gerando pacotes conforme a distribuição de Poisson (distribuição de pacotes aleatória e independente) em uma determinada taxa de K_c pacotes por segundo e com tamanho de pacotes de τ segundos [2].



Fonte: [2]

Figura 10: Representação de um Protocolo ALOHA de Múltiplo Acesso

O *throughput* S_c do canal será:

$$S_c = K_c \cdot \tau \quad (17)$$

sendo $0 \leq S_c < 1$ porque, se $S_c > 1$, a população de usuários estaria gerando pacotes a uma taxa superior à capacidade do canal e todos os pacotes colidiriam. Sendo G_m o tráfego médio no canal do satélite (em pacotes) e admitindo que esse tráfego também siga uma distribuição de Poisson, então a probabilidade de k pacotes chegarem ao canal do satélite durante qualquer intervalo t do tamanho do pacote, é:

$$P[k, t] = \frac{(G_m t)^k}{k!} e^{-G_m t} \quad (18)$$

Como mostra a Figura 11, mesmo uma pequena sobreposição causa uma colisão entre pacotes, então a probabilidade de que não haja colisão quando um pacote é transmitido é exatamente a probabilidade de

que nenhum outro pacote seja gerado durante o intervalo equivalente a dois tamanhos do pacote.

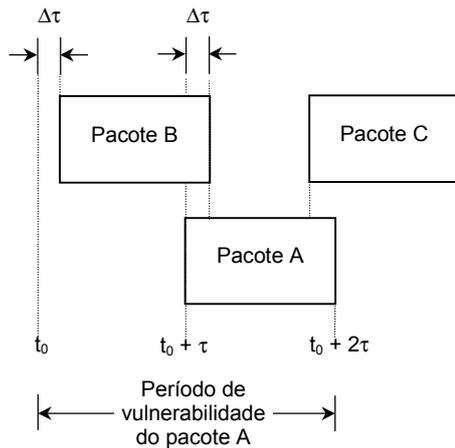


Figura 11: Período de Vulnerabilidade de um Protocolo ALOHA [2]

Da Equação (18) tem-se, então:

$$P[k = 0, t = 2] = e^{-2G_m} \tag{19}$$

Uma vez que o *throughput* do canal S_c é o tráfego de canal G_m multiplicado pela probabilidade de transmissão de pacotes sem colisão, então:

$$S_c = G_m e^{-2G_m} \tag{20}$$

A Figura 12 mostra o *throughput* do canal Aloha versus o tráfego no canal. O *throughput* máximo considerando o valor típico $G_m = 0,5$ será:

$$S_{c,max} = \frac{1}{2e} = 0,184 \tag{21}$$

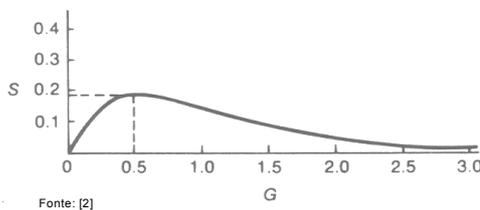


Figura 12: Throughput Versus Tráfego de Canal para Sistema ALOHA

Note que o *throughput* de um canal no sistema Aloha Pura é muito baixo, ou seja, o *throughput* máximo do canal é somente 18,4% da capacidade disponível no canal. Porém esse sistema é recomendado para situações onde haja um grande número de estações, o tráfego seja caracterizado por rajadas (*bursts*) e a capacidade do canal do satélite seja limitada. Nessas situações, o retardo médio de pacote do sistema Aloha é muito melhor que os sistemas TDMA e FDMA, como mostra a Figura 13.

Essas curvas foram plotadas considerando o parâmetro K como sendo a quantidade máxima de intervalos de retransmissão de τ segundos cada, a capacidade do canal do satélite de 250 kbps, o comprimento médio das mensagens de 1000 bits, o retardo de propagação para o satélite de 250 ms, tamanho de pacote de 4 ms e população infinita de usuários. Para o TDMA e FDMA, as curvas foram plotadas considerando população com 1500 usuários.

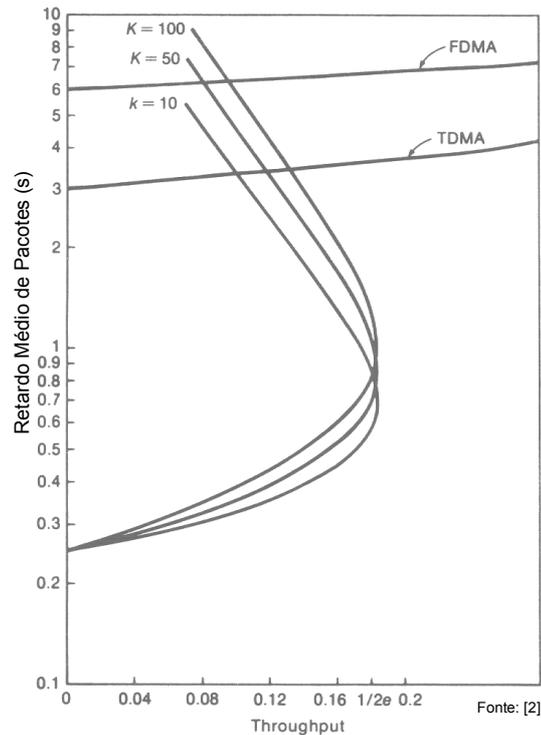


Figura 13: Retardo Médio de Pacotes pelo Throughput de um Canal ALOHA

Outra grande vantagem do sistema Aloha Pura é a simplicidade, o que resulta em um baixo custo das estações usuárias pois não há necessidade de sincronização entre as estações do sistema – cada estação transmite o pacote que estiver no *buffer* [2].

VIII.3 A TÉCNICA ALOHA DISCRETA

Essa técnica, conhecida como *Slotted Aloha*, é uma variação da técnica Aloha Pura, e que reduz a probabilidade de conflitos no acesso ao canal do *transponder*, melhorando, portanto, a eficiência. A redução dos conflitos é conseguida pela imposição de uma disciplina aos instantes de início e duração das transmissões (pacotes). Uma base centralizada de sincronismo divide o tempo em intervalos de duração fixa, do tamanho da duração dos pacotes, que são autorizados para serem transmitidos somente no início dos intervalos [16]. Dessa forma, quando dois pacotes colidirem no canal do satélite, a sobreposição será total como mostra a Figura 14, não ocorrendo sobreposições parciais como no caso do sistema Aloha Pura.

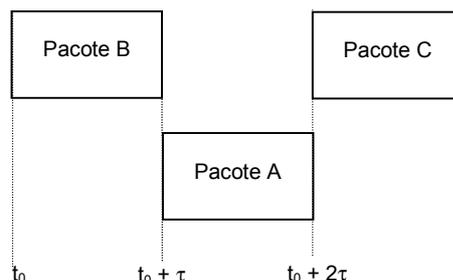


Figura 14: Período de Vulnerabilidade de um Protocolo SLOTTED ALOHA [2]

Assumindo que a população de usuários N seja infinita, o *throughput* do sistema *Slotted Aloha* [2] relaciona-se com o tráfego no canal por:

$$S_c = G_m e^{-G_m} \quad (22)$$

Isto porque o *throughput* do canal é o tráfego do canal G_m vezes a probabilidade de que um pacote gerado não sofra colisão, ou seja:

$$P[k=0, t=1] = e^{-G_m} \quad (23)$$

O *throughput* máximo considerando o valor típico $G_m = 1,0$ para o *Slotted Aloha* será:

$$S_{c,max} = \frac{1}{e} = 0,368 \quad (24)$$

que é o dobro do *throughput* do sistema Aloha Puro. A Figura 15 mostra o *throughput* do canal *Slotted Aloha* versus o tráfego no canal.

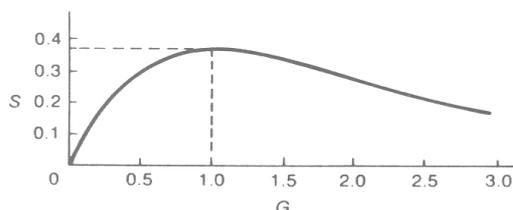


Figura 15: Throughput Versus Tráfego de Canal para SLOTTED ALOHA [2]

IX CONCLUSÕES

Este *tutorial* abordou, de forma resumida, alguns conceitos básicos relacionados às técnicas de transmissão e multiplexação, voltados à comunicação por satélites geoestacionários. Para as técnicas de transmissão analógica, conceituou-se FM e para a transmissão digital, a modulação BPSK. Definiu-se, também, as multiplexações no domínio da frequência e tempo. De forma particular, foi descrito o método de acesso FDMA, apresentando-se conceitos sobre parâmetros para projeto, desempenho de um sistema FDM-FM-FDMA e considerações sobre a transmissão SCPC. Apresentou-se, também, conceitos sobre o método de compartilhamento de recursos do satélite por divisão no tempo. Analisou-se a estrutura dos bursts de tráfego e referência, a eficiência do quadro e capacidade do enlace de satélite com a técnica TDMA. Também foram feitas considerações sobre os tipos de quadros e apresentou-se um exemplo do uso do TDMA na comutação de bordo de um satélite de comunicação. Abordou-se, então, o método de acesso por divisão de códigos, o acesso randômico e as técnicas de alocação fixa e sob demanda. No CDMA, fez-se considerações sobre a técnica *spread spectrum*. Os sistemas DAMA e SPADE forma abordados na seção sobre alocação fixa e sob demanda. Para exemplificar o acesso randômico ao canal do satélite, usou-se as técnicas Aloha Puro e Aloha Discreta.

REFERÊNCIAS

[1] BARGELLINI, Pier L., HYDE, Geoffrey. **Satellite and Space Communications**. In:

VALKENBURG, Mac E. Van. Reference Data for Enginners: Radio, Eletronics, Computer and Communications. 8th Ed. Carmel: Prentice Hall, 1995.

- [2] HA, Tri T. **Digital Satellite Communications**. 2nd Ed. Singapore: McGraw-Hill, 1990.
- [3] MIYA, Kenichi et al. **Satellite Communications Technology**. Tokyo: Institute of Eletronic and Communication Engineers of Japan, 1980.
- [4] GOMES, Alcides T. **Telecomunicações: transmissão e recepção – sistemas pulsados**. 2^a Edição. São Paulo: Érica, 1985.
- [5] PURSLEY, Michael B. **Digital Communications**. In: VALKENBURG, Mac E. Van. Reference Data for Enginners: Radio, Eletronics, Computer and Communications. 8th Ed. Carmel: Prentice Hall, 1995.
- [6] PINES, José. **Telecomunicações: sistemas multiplex**. Livros Técnicos e Científicos, Embratel. RJ: 1978.
- [7] RIBEIRO, Marcelo P. **Telecomunicações: sistemas analógico-digitais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, Embratel, 1980.
- [8] AKYILDIZ, Ian F. et al. **Medium Access Control Protocols for Multimedia Traffic in Wireless Networks**. IEEE Network Magazine, Vol.13, No.4, pp. 39-47 July/August 1999.
- [9] JAMALIPOUR, Abbas. **Low Earth Orbital Satellites for Personal Communications Networks**. Norwood: Artech House, 1998.
- [10] FREEMAN, Roger L. **Radio systems design for telecommunications**. 2nd Ed. John Wiley, 1997.
- [11] MARAL, G.; BOUSQUET, M. **Satellite Communications Systems – Systems, Techniques and Technology**. 3rd Ed. Chichester: J. Wiley, 1998.
- [12] MORGAN, W. L.; GORDON, G. D. **Communications Satellite Handbook**. J. Wiley, 1989.
- [13] PICKHOLTZ, Raymond L. **Communications by Means of Low Earth Orbiting Satellites**. Modern Radio Science, p.96, Oxford University Press, May 1996.
- [14] CALHOUN, George. **Digital Cellular Radio**. Norwood: Artech House, 1988.
- [15] FORCINA, G., Oei, S. SIMHA, S. **The Intelsat DAMA System**. Tenth International Conference on Digital Satellite Communications, p. 571-577, vol.2, 1995.
- [16] GIOZZA, Willian F., et al. **Redes locais de computadores: tecnologia e aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [17] ELBERT, Bruce R. **The Communications Ground Segment and Earth Station Handbook**. Norwood: Artech House.

SOBRE OS AUTORES

Márcio Antônio Protzek é engenheiro eletricitista formado em 1990 pelo CEFET-PR onde atualmente é professor. Está em fase de conclusão do Mestrado em Engenharia Elétrica na UFPR.
E-mail: mprotzek@cefetpr.br

José Ricardo Descardeci recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica em 1991 pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP e o título de Doctor of Philosophy em 1995 pela Universidade de Londres. Trabalhou por 2 anos na Universidade de Londres como pesquisador no Queen Mary College. Atualmente é professor pesquisador na Universidade

Federal do Paraná – UFPR. Sua área de interesse está relacionada com Antenas, Microrondas e Eletromagnetismo Aplicado. É Membro do IEEE, SBMO e atua como revisor do MTT-IEEE, AP-IEEE, Wiley e IEE.

E-mail: descar@eletrica.ufpr.br