

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Ricardo Rodrigues
de Araújo e aprovada pela Comissão
Julgada em 08/07/99
Orientador

Estudo Sobre Métodos de Acesso ao Meio para Redes de Telemetria Baseadas em Espalhamento Espectral

Autor:

Ricardo Rodrigues de Araújo → Autor

Orientador:

Prof. Dr. Oséas Valente de Avilez Filho

Banca:

Prof. Dr. João César de Moura Mota DEE-
UFC

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira FEEC-
DEMIC

Prof. Dr. Oséas Valente de Avilez Filho
FEEC-DEMIC

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica e de Computação da Universidade
Estadual de Campinas como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, SP – Brasil

1999 → AM



UNIDADE	BAE/FCE
N.º CHAMADA:	UNICAMP
V.	EX.
TOMBO BC/	39942
PROC	278/00
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	12/04/00
N.º CPD	

CM-00137B42-0

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar15e

Araújo, Ricardo Rodrigues de

Estudo sobre métodos de acesso ao meio para redes de telemetria baseadas em espalhamento espectral. / Ricardo Rodrigues de Araújo.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Oséas Valente de Avilez Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Comunicação com dispersão de espectro. 2. Sensoriamento remoto. 3. Redes de computação - Protocolos. I. Avilez Filho, Oséas Valente. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Resumo

Este trabalho objetiva o estudo de estratégias para implementação de uma rede metropolitana de telemetria baseada no uso da técnica de espalhamento espectral. São enfocados aspectos referentes à topologia da rede e aos protocolos de acesso ao meio. É apresentado um modelo para análise de vazão de redes empregando *unslotted aloha* em conjunto com espalhamento espectral, técnica *Direct Sequence*, como estratégia para múltiplo acesso. É considerada a transmissão de pacotes de tamanho fixo bem como a flutuação aleatória do nível de interferência multi-usuário. Também é avaliado o ganho de desempenho obtido pelo sistema através da inclusão do protocolo CLSP (*Channel Load Sensing Protocol*). Através de resultados de simulação dos modelos propostos é mostrado o limiar ótimo a ser usado neste protocolo. O trabalho é finalizado sugerindo uma topologia a ser empregada na rede metropolitana de telemetria.

Abstract

This work intends to make a study of strategies for implementing a telemetry metropolitan area network based on spread spectrum technology. Referring aspects of the network topology and the media access control protocols are focused. A model of throughput analysis for direct sequence spread spectrum multiple access network is presented. The transmission of fixed length packets as well as the random multi-user interference is considered. The gain of system performance obtained by the inclusion of the CLSP protocol is also evaluated through results of simulations of the considered models. The excellent threshold to be used in this protocol is shown. The work is finished suggesting a topology to be employed in the telemetry network.

Agradecimentos

Findo mais esta etapa certo de que não o faria sem o apoio daqueles que são caros. Apoio este, algumas vezes tácito, outras explícito, mas em ambos os casos valioso. Gostaria neste momento de externar minha gratidão a todos que, com suas parcelas, contribuíram para a execução deste. Agradeço aos meus colegas de departamento que com sua alegria tornaram prazeroso o convívio no ambiente de trabalho, ao meu orientador, principalmente pela confiança em mim depositada neste e em outros desafios, a Josaphat Engenharia, especialmente a Zander pela parceria. Gostaria de fazer um agradecimento especial aos órgãos de fomento que através das bolsas concedidas me forneceram o suporte financeiro para cumprir esta tarefa. De maneira especial quero expressar minha gratidão ao conjunto dos trabalhadores deste país que com seu suor e através de suas contribuições tornam possível a existência de pesquisa neste país. Finalmente agradeço aos meus pais e a minha esposa por compreenderem e apoiarem este trabalho e por terem a paciência para suportar os longos momentos de distância.

“Se você abre uma porta, você pode ou não entrar em uma nova sala. Você pode não entrar e ficar observando a vida. Mas se você vence a dúvida, o temor, e entra, dá um grande passo: nesta sala vive-se! Mas, também, tem um preço... São inúmeras outras portas que você descobre. Às vezes curte-se mil e uma. O grande segredo é saber quando e qual porta deve ser aberta. A vida não é rigorosa, ela propicia erros e acertos. Os erros podem ser transformados em acertos quando com eles se aprende. Não existe a segurança do acerto eterno. A vida é generosa, a cada sala que se vive, descobre-se tantas outras portas. E a vida enriquece quem se arrisca a abrir novas portas. Ela privilegia quem descobre seus segredos e generosamente oferece afortunadas portas. Mas a vida também pode ser dura e severa. Se você não ultrapassar a porta, terá sempre a mesma porta pela frente. É a repetição perante a criação, é a monotonia monocromática perante a multiplicidade das cores, é a estagnação da vida... Para a vida, as portas não são obstáculos, mas diferentes passagens!”

(Içami Tiba)

Índice Geral.

Tópico	pg.
1. Introdução	
1.1. Introdução	1
2. Spread Spectrum	
2.1. Introdução	5
2.2. O que é Spread Spectrum	5
2.3. Histórico	14
2.4. Técnicas de espalhamento espectral	16
2.4.1. Direct sequence	16
2.4.2. Frequency hopping	18
2.4.3. Time hopping	19
2.5. Comparação entre as técnicas	20
2.6. Aplicações de Sistemas de <i>Spread Spectrum</i> .	22
3. Telemetria	
3.1. Introdução	24
3.2. O Sistema de telemetria	25
3.2.1 Subsistema de aquisição de dados	25
3.2.2 Subsistema de armazenamento	26
3.2.3 Subsistema de multiplexagem	26
3.2.4 Subsistema de comunicação	26
3.2.5 Subsistema de atuação e controle	26
3.2.6 CPU	27
3.3 Classificação dos sistemas de telemetria	27
3.3.1 Sistemas de transmissão com fio	28
3.3.1.1 Linhas dedicadas	28
3.3.1.2 Linhas compartilhadas	28
3.3.2 Sistemas de transmissão sem fio	29

Tópico	pg.
3.4 Vantagens de um sistema de telemetria sem fio sobre um sistema convencional.	31
3.4.1 Spread Spectrum	32
3.4.1.1 Custo de implantação X custo de manutenção	33
3.5 Considerações finais	33
4 Controle de Acesso ao Meio	
4.1 Introdução	34
4.2 Redes sem fio	35
4.3 Classificação dos Protocolos de Controle de Acesso	36
4.3.1 Sistemas Centralizados	37
4.3.1.1 CDMA	37
4.3.1.2 FDMA	37
4.3.1.3 TDMA	38
4.3.1.4 <i>Polling</i>	39
4.3.2 Sistemas Distribuídos	39
4.3.2.1 Aloha	40
4.3.2.2 Aloha com Reserva	43
4.3.2.3 CSMA	44
4.3.2.4 RTS-CTS	45
4.4 Escolha do Protocolo de Acesso ao Meio	46
4.5 Análise de Vazão de uma Rede <i>Spread Spectrum</i> utilizando <i>Unslotted Aloha</i> como Método de Acesso ao Meio.	48
4.5.1 O Modelo	49
4.6 Resultados	56
4.7 Conclusões.	62
5 Uma visão geral da rede	
5.1 Uso de células	63
5.2 Transferência de dados entre células	65

Tópico	pg.
5.3 O meio de transmissão inter-células.	65
5.4 Conclusões finais	66
6 Referências bibliográficas	68

Capítulo 1: Introdução.

1. Introdução.

Vivemos em uma sociedade onde a informação representa um valor indispensável. De fato, na maioria das atividades realizadas odiernamente há uma dependência direta ou indireta da troca de informações, quer seja em nível interpessoal; entre setores de uma mesma empresa; entre empresas e entre organizações mais complexas.

Esta demanda por informação gera um volume de dados imenso, o que impulsionou, sobretudo nos últimos dez anos, o desenvolvimento e implementação de infra-estruturas capazes de dar vazão ao tráfego gerado, principalmente nas áreas de redes de dados e protocolos. Dentre estas plataformas podemos citar como exemplo: redes de banda larga como RDSI (Rede Digital de Serviços Integrados), redes ATM, redes sem fio de pacotes, protocolos de interconectividade entre redes dentre outras.

Alguns tipos de atividades comerciais, industriais ou de serviços apresentam como características relevantes a necessidade de coletar dados de determinadas fontes, as quais estão geograficamente distribuídas em grandes regiões, como por exemplo uma cidade. A tabela 1.1 ilustra exemplos de tais empresas e suas aplicações.

Atividades	Aplicações ligadas à aquisição de dados.
Companhias de água e esgotos	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorização de bombas, válvulas e outros equipamentos em estações de tratamento e estações elevatórias. - Monitorização de consumo de água de usuários para fins de fiscalização e tarifação.
Companhias de energia elétrica	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorização de equipamentos de proteção e segurança em subestações. - Monitorização de consumo de energia elétrica dos usuários para fins de fiscalização e tarifação.
Companhias telefônicas	<ul style="list-style-type: none"> - Detecção de violação em armários de distribuição e outros equipamentos.
Empresas ligadas à área de recursos ambientais	<ul style="list-style-type: none"> - Coleta de dados meteorológicos. - Acompanhamento de recursos hídricos: níveis de barragens, rios e outros.
Órgãos públicos	<ul style="list-style-type: none"> - Fiscalização de equipamentos públicos.
Órgãos ligados à fiscalização e planejamento de trânsito	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorização do fluxo de veículos nas vias de tráfego.
Empresas de segurança	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorização de alarmes.

Tabela 1.1. Atividades que dependem da aquisição de dados telemétricos.

A maioria dos dados mencionados nesta tabela apresenta características em comum tais como: baixa velocidade, são gerados de forma aleatória, tolerantes a pequenos retardos de transmissão, ou seja, são dados típicos de sistemas de telemetria.

As plataformas citadas anteriormente estão voltadas para o tráfego de dados em altas velocidades e em alguns casos não tolerantes ao atraso de transmissão como dados de voz e vídeo conferência. Em outras palavras, estas plataformas estão dimensionadas para tráfegos muito mais intensos do que aquele gerado pelas aplicações citadas na tabela 1.1. O uso das referidas plataformas como suporte para a transmissão destes dados proporcionaria

uma sub utilização dos recursos, o que, por sua vez, acarretaria em um custo superior ao necessário para a realização da transferência de dados para as aplicações mencionadas.

Uma solução melhor seria a utilização de uma rede dedicada para aplicações de telemetria capaz de suportar tráfego gerado pelas diversas fontes de informação e apta a compartilhar seu uso com as mais diferentes aplicações de vários usuários simultaneamente.

Para atingir este objetivo uma rede deve proporcionar alguns requisitos básicos tais como os citados a seguir.

- Flexibilidade: a inclusão e a exclusão de pontos de coleta de dados na rede deve ser feita de forma transparente ao demais pontos do sistema sem que seja necessário qualquer reconfiguração de topologia ou protocolos.
- Simplicidade: a instalação dos equipamentos necessários para a inclusão de um novo ponto na rede deve ser simples e rápida, afim de evitar qualquer prejuízo decorrente de atrasos nas aplicações a que se destinam.
- Baixo custo: o custo por aplicação deve ser menor do que o exigido em outras soluções com mesmas características de qualidade de serviço, caso contrário não se justificaria a utilização deste tipo de rede.
- Confiabilidade: os dados gerados nos pontos de coleta devem ser transmitidos e armazenados com sucesso nos respectivos concentradores segundo critérios estabelecidos para cada aplicação.
- Qualidade de serviço: o efeito conjunto das características de desempenho da rede (atraso de propagação, variação do atraso de propagação, taxa de perda de pacotes e outros) deve ser tal que atenda às necessidades dos usuários das diversas aplicações existentes na rede.

Neste trabalho estamos propondo como uma solução para o tráfego deste tipo de informação o uso de uma rede sem fio metropolitana de telemetria utilizando *spread spectrum*. Iremos, no decorrer do trabalho, justificar a escolha de tal solução. Para isto estruturamos esta dissertação da seguinte forma: capítulo introdutório, capítulo sobre

spread spectrum, capítulo sobre sistemas de telemetria, capítulo sobre métodos de acesso ao meio e capítulo de conclusões.

No segundo capítulo falaremos sobre alguns conceitos básicos da técnica de espalhamento espectral de forma a permitir que leitores não familiarizados com o assunto possam ter uma visão geral sobre o tema e acompanhar os desdobramentos dos capítulos seguintes. No capítulo sobre sistemas de telemetria faremos uma classificação dos mesmo segundo a forma como os dados são transmitidos. No capítulo seguinte iremos fazer um apanhado dos principais protocolos de acesso ao meio e proporemos aquele que mais se adequa às necessidade da rede. Apresentaremos ainda um modelo para análise de vazão da rede. No último capítulo faremos alguns comentários sobre a topologia final da rede, apresentaremos as conclusões e considerações finais, bem como sugeriremos propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2: Spread Spectrum

2.1 Introdução.

As técnicas de espalhamento espectral, ou *spread spectrum*, surgiram como resposta às necessidades de comunicação militares. Elas são baseadas em métodos de sinalização, os quais expandem imensamente a banda espectral utilizada para a transmissão em relação à taxa de dados enviados. Nos anos recentes inúmeras aplicações civis foram desenvolvidas. Existe um crescimento no interesse nestas técnicas, principalmente em comunicações móveis, comunicações via satélites e sistemas de geoposicionamento.

Projetistas de sistemas de comunicações estão geralmente preocupados em como o sistema utiliza a energia do sinal e a banda espectral. Em muitos casos estas são as mais importantes características do sistema. Em alguns casos, no entanto, a necessidade do sistema é ser resistente a interferências externas, operar com baixa energia espectral, possibilitar múltiplo acesso sem controle externo e providenciar transmissão segura da informação. *Spread spectrum*, por meio de suas características, permite alcançar os objetivos acima colocados. Como isto é feito? Esta pergunta é o que tentaremos responder no decorrer deste capítulo, o qual está estruturado da seguinte forma: introdução, o que é *spread spectrum*, histórico, técnicas de espalhamento espectral e aplicações.

2.2 O que é *Spread Spectrum*.

De forma bastante genérica podemos dizer que *spread spectrum* é uma técnica de modulação na qual a largura de banda utilizada para a transmissão de uma determinada informação é muitas vezes maior do que o comprimento de banda da própria informação. Este conceito, apesar de não estar errado, não nos diz muito a respeito da técnica de espalhamento espectral em si. Baseado no que foi exposto acima, poderíamos imaginar que ao utilizarmos modulação em frequência, por exemplo, na qual o comprimento de banda usado para a transmissão fosse cem vezes maior do que o

comprimento da banda do sinal de informação estaríamos realizando uma transmissão em *spread spectrum*. No entanto, não é isso que se tem em mente quando falamos de *spread spectrum*. De fato Scholtz [1] descreve um sistema de espalhamento espectral como possuindo pelo menos as três características seguintes:

- a portadora é um sinal de banda larga “imprevisível” ou pseudo aleatório,
- a banda espectral do sinal transmitido é muitas vezes maior do que a do dado e
- a recepção é realizada através de uma correlação entre o sinal de banda larga enviado e uma réplica do sinal usado para expandir a banda.

Afinal o que vem a ser esta técnica? Apresentamos a seguir um exemplo simplificado de um sistema de comunicação digital que opera em tempo discreto onde tentamos ilustrar o mecanismo de espalhamento espectral e alguns de seus efeitos. Imaginemos um sistema de comunicação digital no qual se transmite através de um canal AWGN uma seqüência de informação do tipo $\{b_m\}$, onde $b_m = +1$ ou -1 . Ao ser transmitida, esta seqüência sofre influência do canal de forma que no receptor teremos uma outra seqüência do tipo $r_m = Eb_m + w_m$, onde $E > 0$ é a potência do pulso representando cada bit e w_m é o ruído aditivo branco gaussiano com média nula. Um simples receptor para este sistema seria um detetor de limiar onde o critério de decisão seria: $r_m > 0$ então $+1$ foi enviado e $r_m < 0$ então -1 foi enviado. Estamos imaginando que os bits $+1$ e -1 são gerados com igual probabilidade, desta forma o critério de decisão será, simplesmente, $y_m = \text{sgn}(r_m)$. Caso contrário teríamos um critério baseado em uma função y_m do sinal recebido mais complexa. O desempenho do receptor é baseado nas estatísticas da função de decisão y_m . Neste caso podemos perceber que y_m é uma variável aleatória com média b_mE e variância σ^2 [2]. O desempenho do sistema pode ser medido pela figura de mérito probabilidade de erro de bit, a qual para a modulação PAM (*pulse amplitude modulation*) é função da razão E/σ [2].

Agora, ao invés de transmitir um simples pulso por cada bit, iremos enviar uma seqüência de N pulsos iguais a $+1$ ou -1 . Desta forma a duração do bit de informação é dividido em N subintervalos. O sinal transmitido para cada bit agora é:

$$s_n = E_c b, n = 0, \dots, N-1. \quad (1)$$

Durante cada subintervalo um pulso de potência $E_c = E/N$ é transmitido. Estes sub bits são chamados de *chips*. Da mesma forma que antes, a informação transmitida sofrerá

influência do canal de modo que teremos na recepção a seguinte seqüência: $r_n = E_c b + w_n$, onde o ruído, neste caso, apresenta variância σ^2/N e média nula.

Para este caso teremos um receptor com uma função de decisão diferente do anterior. Agora empregaremos uma função de correlação sobre o sinal recebido, ou seja nossa função de decisão será

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} r_n \text{ ou } \sum_{n=0}^{N-1} (E_c b + w_n) = N E_c b + \sum_{n=0}^{N-1} w_n. \quad (2)$$

Como o ruído apresenta média zero, último termo da expressão é nulo, logo a função de decisão será $N E_c b = E_b$. Novamente o desempenho do sistema será determinado pela razão E/σ . Notamos que não houve alteração do desempenho deste esquema para o anterior.

Podemos rescrever a equação do sinal transmitido da seguinte forma :

$$s_n = E_c b c_n, n = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

onde cada $c_n = \pm 1$. O que fizemos agora foi explicitar o valor de cada *chip*. A novidade introduzida através de *spread spectrum* está na geração da seqüência de *chips*. Ao invés de termos um conjunto de N valores iguais à informação que se deseja transmitir, temos um conjunto de N *chips* com características bem definidas.

Iremos assumir que a seqüência $\{c_n\}$ é cíclica e com período N, ou seja

$$\sum_{n=0}^{N-1} c_n c_{n+k} = N \text{ para qualquer } k. \quad (4)$$

Agora especificaremos as características fundamentais que compõem a seqüência $\{c_n\}$, doravante chamada de seqüência de espalhamento. A média de $\{c_n\}$ deverá ser aproximadamente zero, ou seja

$$1/N \sum_{n=0}^{N-1} c_n \approx 0. \quad (5)$$

De fato o número de ocorrências de +1 na seqüência difere de um do número de ocorrências de -1, logo a média de $\{c_n\}$ será $1/N$.

Outra característica é a sua auto correlação, a qual obedece o seguinte comportamento:

$$1/N \sum_{n=0}^{N-1} c_n c_{n+i} = 1 \text{ se } i = 0 \text{ ou } 1/N \sum_{n=0}^{N-1} c_n c_{n+i} = -1/N \text{ se } 0 < |i| < N. \quad (6)$$

Podemos observar por estas duas características que a seqüência de espalhamento possui propriedades semelhantes a uma seqüência de variáveis aleatórias independentes com média nula. Por isto $\{c_n\}$ também é conhecida por pseudo ruído.

O receptor para um sinal de *spread spectrum* deverá realizar uma correlação entre o sinal recebido e uma cópia da seqüência de espalhamento utilizada para transmissão da informação. Desta forma a variável de decisão será

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} r_n c_n. \quad (7)$$

Desmembrando equação (7) teremos

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} (E_c b c_n + w_n) c_n. \text{ resultando:}$$

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} E_c b c_n c_n + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n. \quad (8)$$

Pela propriedade de auto-correlação temos que o primeiro somatório é igual a $NE_c b$, resultando:

$$y = NE_c b + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n. \quad (9)$$

Temos nossa variável de decisão novamente com média E_b e variância σ^2 . Novamente não obtivemos melhoria no desempenho do sistema com espalhamento espectral em um canal AWGN com relação ao não espalhado. Podemos certificar isto pela razão E/σ que se

manteve inalterada. Isto porque o ruído contribui com a mesma potência em ambos os casos.

Então qual a vantagem de um sistema com espalhamento espectral? Esta pergunta pode ser respondida analisando o desempenho do sistema frente a interferência. Imaginemos que o sinal transmitido sofra uma interferência constante I . Na recepção teremos

$$r_n = E_c b c_n + i_n + w_n. \quad (10)$$

Em um sistema com uma função de decisão igual a

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} r_n \quad (11)$$

teremos a média de y igual $E_b + I$ e variância σ^2 . Se I for suficientemente grande haverá erro na decisão. Por outro lado, um sistema com espalhamento espectral terá como função de decisão

$$y = \sum_{n=0}^{N-1} (E_c b c_n + i_n + w_n) c_n = E_b + I \sum_{n=0}^{N-1} c_n + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n. \quad (12)$$

Como a média de c_n é aproximadamente zero temos

$$y \approx E_b + 0 + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n. \quad (13)$$

Logo a contribuição da interferência foi suprimida no processo de correlação.

Analisemos agora o comportamento do sistema frente ao fenômeno de múltiplos caminhos de propagação. Em canais onde isto acontece temos, no receptor, várias cópias do sinal transmitido cada uma com um atraso temporal e uma diferença de fase com relação às outras. Isto é devido às diferentes distâncias percorridas em cada caminho. Estas cópias podem interferir no sinal desejado de forma construtiva ou destrutiva dependendo da fase com que cheguem ao receptor. Neste último caso teremos um desvanecimento do sinal. Quando o período do bit é da ordem do atraso sofrido pelas cópias nos deparamos com um novo problema: a interferência inter-símbolo. Neste caso teremos no receptor um sinal

referente ao bit i proveniente de um caminho em visada direta mais um sinal referente ao bit $i-1$ o qual sofreu diversas reflexões em diferentes obstáculos percorrendo, assim, um caminho maior e portanto sofrendo um atraso também maior. Quando este processo ocorre temos interferência entre os bits adjacentes .

Imaginemos a seguinte seqüência transmitida $s_n = E_c b c_n$. Na recepção teremos uma cópia proveniente de um caminho em visada direta e outra originada a partir de reflexões do sinal original apresentando um atraso t . O primeiro chegará com uma atenuação α enquanto que o segundo com atenuação β . O sinal recebido será:

$$\begin{aligned} r_n &= \alpha b_i c_n + \beta b_{i-1} c_{N-t-1} + w_n, \quad n = 0, 1, \dots, t-1 \\ &= \alpha b_i c_n + \beta b_i c_{n-t} + w_n, \quad n = t, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (14)$$

Estamos considerando que o atraso é menor do que o tempo de duração do bit. Nossa variável de decisão será definida pela função:

$$y_i = \sum_{n=0}^{N-1} c_n r_n, \text{ desenvolvendo teremos:}$$

$$y_i = N\alpha b_i + \beta b_{i-1} \sum_{n=0}^{t-1} c_{N-t+n} c_n + \beta b_i \sum_{n=t}^{N-1} c_{n-t} c_n + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n \quad (15)$$

onde teremos

$$y_i \approx N\alpha b_i + 0 + 0 + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n \quad (16)$$

O sinal refletido é suprimido no processo de correlação com a seqüência de espalhamento. Podemos ver o efeito do fenômeno de múltiplos caminhos em sistemas sem espalhamento espectral fazendo $c_n = 1$ no exemplo anterior. Desta forma obteremos :

$$y_i = N\alpha b_i + \beta b_{i-1} + \beta(N-t)b_i + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n. \quad (17)$$

Observamos que a energia de bits adjacentes causa interferência promovendo a degradação do desempenho do sistema.

Analisamos o comportamento de um sistema *spread spectrum* frente a algumas situações onde foi possível observar um desempenho melhor desta técnica com relação às técnicas convencionais. No entanto, a principal vantagem, que confere a este método grande interesse, não reside simplesmente na robustez frente à interferência e múltiplos caminhos, mas sim na capacidade de múltiplo acesso, ou seja, a possibilidade de vários usuários poderem utilizar a mesma banda de frequência simultaneamente. Vejamos como é feito isto através do exemplo abaixo.

Imaginemos que existem k usuários transmitindo dados sobre um mesmo canal. A cada usuário é assinalada uma seqüência de espalhamento única de forma que o k -ésimo transmissor possua a seqüência $\{c_n^k\}$. As seqüências utilizadas pelos k membros deste conjunto possui a seguinte propriedade de correlação cruzada:

$$\begin{aligned} & 1, \quad k = j, i = 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c_n^k c_{n+i}^j & \approx 0, \quad k = j, 0 < |i| < N \\ & 0, \quad k \neq j \end{aligned} \quad (18)$$

Desta forma temos um conjunto de k seqüências de espalhamento com correlação cruzada nula e auto-correlação unitária.

Agora imaginemos que os k usuários estão transmitindo e que temos apenas interesse na informação enviada pelo transmissor número 1. O sinal recebido será

$$r_n = \sum_{k=1}^K b_m^k c_n^k + w_n. \quad (19)$$

A função que gera a variável de decisão para a recuperação do sinal do transmissor 1 é :

$$y_m^1 = b_m^1 \sum_{n=0}^{N-1} c_n^1 c_n^1 + \sum_{k=2}^K b_m^k \sum_{n=0}^{N-1} c_n^k c_n^1 + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n^1. \quad (20)$$

O segundo termo é conhecido como interferência multi-usuário. Utilizando a propriedade de correlação cruzada vista anteriormente teremos:

$$y_m \approx Nb_m^1 + 0 + \sum_{n=0}^{N-1} w_n c_n^1. \quad (21)$$

Desta forma, a propriedade de correlação cruzada, algumas vezes chamada de ortogonalidade mútua, das seqüências permite que transmissões simultâneas em um mesmo canal sejam perfeitamente detectadas. Por este motivo, a técnica de espalhamento espectral pode ser utilizada como um método de múltiplo acesso, tal como o método de divisão por tempo TDMA (*Time Division Multiple Access*) ou o método de divisão por freqüência FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). O uso de seqüências de espalhamento ou códigos de espalhamento para obtenção de múltiplo acesso é chamado de divisão por código CDMA (*Code Division Multiple Access*).

Os resultados anteriores nos mostram que o espalhamento espectral nos fornece resistência a:

- interferência,
- múltiplos caminhos e
- interferência multi-usuário .

Estas características conferem a um sistema *spread spectrum* algumas figuras de desempenho que o tornam especial quando comparados a outros sistemas convencionais[3]. São elas:

- Baixa probabilidade de interceptação pode ser alcançado por meio de um elevado ganho de processamento, sinal de portadora imprevisível e baixa potência espectral fazendo com que o sinal não seja distinguível, por parte de terceiros, do ruído de fundo.
- Capacidade *anti-jam*, ou seja, resistência à interferência produzida intencionalmente é assegurada devido à natureza pseudo aleatória da portadora. Isto impossibilita o *jammer*, aquele que produz a interferência, de observar o sinal e melhorar o desempenho de seu sistema de interferência, obrigando-o a usar técnicas baseadas na independência do sinal a ser bloqueado.
- Pares de receptores e transmissores usando códigos independentes podem conviver em uma mesma faixa de freqüência com baixa interferência co-canal.

Certamente o modelo utilizado para demonstrar os conceitos anteriores é

bastante simplificado e portanto não é tão preciso. De fato, as propriedades de correlação foram idealizadas. Na prática os códigos não são totalmente ortogonais e portanto há uma degradação do desempenho quando o número de usuários aumenta. Todavia, esta degradação é progressiva e não ocorre abruptamente, o que permite a inclusão de novos usuários no sistema sem que haja uma "queda" da rede, como ocorre em outros métodos de acesso ao meio.

Outra simplificação usada foi o modelamento através de um sistema PAM que é um modelo de banda básica, ou seja, não há portadora senoidal utilizada. Em geral, é possível usar esta representação equivalente em banda básica para análise de sistemas de comunicação sem fio[4]. Outra observação a ser feita é com relação ao conjunto de sinais utilizados para a codificação da informação. Neste caso fizemos uso de uma codificação binária antipodal, ou seja, apenas dois símbolos são usados, +1 e -1. Além disto supomos perfeita sincronização no receptor - detecção coerente. Em muitos casos poderemos desejar a utilização de uma constelação maior de símbolos, bem como considerar detecção não coerente. Estas generalizações podem ser acomodadas em nosso modelo permitindo que a seqüência seja expressa na forma complexa $b = |b| e^{j\theta}$, e adicionando um desvio de fase arbitrário na seqüência recebida de modo a termos $r_n = Ecbe^{j\theta} + w_n$.

Analisamos um sistema *spread spectrum* através de um modelo simples e discreto no tempo, o qual através de sua simplicidade nos permite compreender o mecanismo básico de seu funcionamento. No entanto podemos chegar a conclusões semelhantes partindo de uma análise teórica, utilizando para tanto a teoria da informação de Shannon.

Neste trabalho publicado em 1948 [5], Shannon, entre outras coisas, relacionava a capacidade de transmissão de um canal com a banda utilizada, a potência do sinal e a potência do ruído presente no canal através da célebre equação:

$$C = W \log_2(1 + S/N)$$

onde,

C = capacidade do canal em bits/segundo;

W = banda utilizada em Hz;

S = potência do sinal e

N = potência do ruído (ruído térmico mais interferência).

Por esta equação podemos ver que dada uma determinada razão sinal/ruído, aumentando-se a banda utilizada para transmitir há um incremento na capacidade do canal. Por outro lado, se desejarmos tornar imperceptível o sinal enviado, afim de evitar a detecção da transmissão por terceiros, pode-se diminuir a potência empregada fazendo que a razão sinal/ruído SNR (*Signal to Noise Ratio*) seja menor que 1 e aumentar a banda usada para transmitir de forma a manter a mesma capacidade do canal. De fato, para SNR menores que 1, a equação da capacidade do canal pode ser aproximada por:

$C = 1,44WS/N$, o que facilita a visualização desta última observação.

Agora faremos um breve histórico do desenvolvimento da técnica de espalhamento espectral.

2.3 Histórico [6].

Desde o nascimento da rádio transmissão em 1888, através dos experimentos de Heirich Hertz demonstrando a propagação de ondas eletromagnéticas através do éter, até o final da Segunda Grande Guerra, um grande salto foi dado, tanto no campo tecnológico como no campo de aplicações, no sentido de tornar as comunicações sem fio uma necessidade cada vez mais fundamental. Durante este período surgiram e foram amadurecidas as técnicas básicas de rádio transmissão, e com a implementação das mesmas, novas aplicações e necessidades apareciam tornando mister o aperfeiçoamento de tais técnicas. Este processo culmina com o desenvolvimento de formas mais eficazes, inclusive o *spread spectrum*, de transmitir informação através de ondas eletromagnéticas.

Um dos primeiros desafios a serem superados pelas técnicas tradicionais foi a utilização racional do espectro de frequência. Isto foi devido à grande proliferação de redes de rádio difusão. A tecnologia da época não permitia a transmissão em frequências mais elevadas, desta forma para se garantir uma determinada qualidade vinculada a uma dada taxa de informação o artifício utilizado era aumentar a potência dos transmissores.

A partir de 1924, estudos apontam relação entre banda de frequência utilizada e qualidade/taxa de informação transmitida. Nos anos 20 os primeiros sistemas de radar começaram a operar. Com o desenvolvimento dos mesmos percebeu-se que

expandindo-se a banda de frequência usada a precisão sobre a informação de posicionamento de alvos aumentava. Neste período percebemos os fundamentos básicos que levariam ao desenvolvimento do *spread spectrum*. No entanto, foi durante a Segunda Grande Guerra que as pesquisas tomaram impulso. Neste momento o uso de sistemas de radar e de comunicação sem fio era fundamental para o sucesso em manobras de ataque e/ou defesa dos exércitos. Para impedir o uso de tais sistemas foram criados métodos para interferir e capturar transmissões e confundir o sistema de radares do exército inimigo.

Surgiu, então, o grande motivador para o desenvolvimento de um método resistente a interferência e “invisível” para o inimigo. Em 1935 engenheiros alemães desenvolvem um sistema de comunicação onde o sinal de voz é mascarado por um ruído de banda larga produzido por um disco girante. No receptor existia outro disco girante sincronizado com o primeiro, o que possibilitava a recuperação do sinal de voz. Era antecessor do sistema *direct sequence*. Outros sistemas semelhantes ao *spread spectrum* para comunicação e orientação para mísseis resistentes à interferência foram criados nesta época. Podemos dizer que foram os avós dos atuais sistemas.

Somente em 1948, com a invenção do transistor e com a publicação da teoria da informação de Claude Shannon foram lançadas as bases técnicas e teóricas para o surgimento do *spread spectrum*. De fato nos anos subsequentes começaram a operar os primeiros sistemas *direct sequence* de comunicação, embora as principais pesquisas na área não estivessem disponíveis para toda a comunidade acadêmica, visto que entre 1948-60 os trabalhos desenvolvidos tinham caráter militar.

Na década de 50 conceitos como ganho de processamento, interferência multiusuário e outros foram se cristalizando de forma a despertar o interesse do uso de *spread spectrum* como método de múltiplo acesso. Já nos primeiros anos da referida década algumas publicações foram destinadas à análise de desempenho de sistemas que empregavam divisão por código como método de acesso ao meio, o CDMA (*Code Division Multiple Access*), e à comparação deste sistemas com outros métodos de acesso ao meio, tais como divisão por tempo, o TDMA (*Time Division Multiple Access*) e divisão por frequência, o FDMA (*Frequency Division Multiple Access*).

Em 1978, quando o primeiro sistema de telefonia celular, o AMPS, realizava seus testes, foi sugerido que o uso de *spread spectrum* propiciaria maior eficiência. A

primeira aplicação comercial de *spread spectrum* a ser amplamente utilizada ocorreu a partir de 1981, através do sistema de satélites e estações terrestres implementado pela companhia Equatorial Communications. Em 1985 o órgão americano responsável pela regulamentação e licenciamento do uso do espectro de frequências em sistemas de comunicações e outros emissores de radiação eletromagnética o FCC (*Federal Communications Commission*), adota políticas de incentivo ao uso e desenvolvimento de sistemas em *spread spectrum* . Em 1993 é adotado o padrão IS-95 para telefonia celular usando CDMA como método de acesso e dois anos depois, em Seattle, é implementada a primeira estação rádio base a utilizar esta técnica. Odiernamente os sistemas CDMA disputam espaço na telefonia celular digital com os sistemas TDMA.

Hoje em dia um vasto leque de novas aplicações utilizando *spread spectrum* surgem à medida que esta tecnologia se torna cada vez mais difundida. Esta disseminação é motivada, além das qualidades inerentes à técnica, pela não necessidade de licença legal para o uso em determinadas faixas de frequência de equipamentos com a potência de transmissão de até 1W, o que torna o desenvolvimento e utilização de um produto menos burocrático e por conseguinte menos oneroso.

2.4 Técnicas de Espalhamento Espectral.

Existem várias técnicas usadas para realizar o espalhamento espectral de um sinal a ser transmitido. Dentre estas, duas se destacam: *Direct Sequence* e *Frequency Hopping*. Outras técnicas como Time Hopping, FM pulsado são usadas em aplicações bem específicas, enquanto as duas anteriormente mencionadas e suas formas híbridas apresentam maior aplicabilidade [3].

2.4.1 Direct Sequence.

Técnica amplamente difundida que consiste na pré-modulação dos bits de informação por uma cadeia de *chips* que formam o código pseudo aleatório (*PNsequence*). Está pré-modulação é feita simplesmente realizando uma operação “ou exclusivo” entre os

bits de informação e a seqüência de espalhamento (*PN sequence*). O sinal proveniente deste processo modula uma portadora e por final é amplificado e transmitido.

O modelo usado no início deste capítulo para ilustrar o mecanismo de funcionamento do *spread spectrum* é um exemplo de *direct sequence*.

Nesta técnica o espalhamento espectral ocorre exatamente na pré-modulação. Antes desta etapa temos bits de informação com comprimento T_b segundos. Podemos imaginá-los como pulsos de duração T_b s. Aplicando a transformada de Fourier teremos como resultado um espectro de freqüência na forma de uma função *sync* com o primeiro cruzamento por zero em $2\pi/T_b$ Hz. Após a pré-modulação teremos *chips* com comprimento de T_b/N s, onde N é a relação entre taxa de *chips* e taxa de bits. De forma análoga, ao realizarmos a transformada de Fourier obteremos um espectro de freqüência similar ao anterior, mas com o primeiro cruzamento por zero em $N2\pi/T_b$ Hz, ou seja, a banda foi ampliada N vezes como pode ser visualizado na figura a seguir.

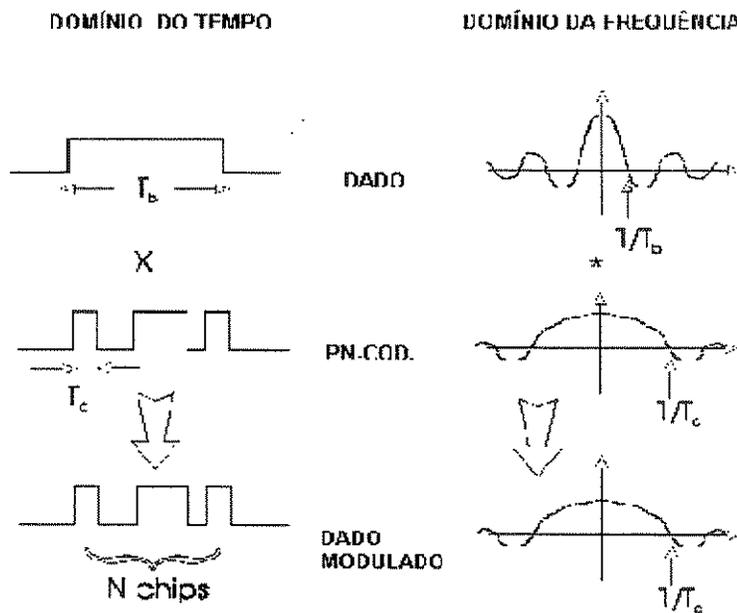


Fig 2.1 Espectro de freqüência de um sinal direct sequence.

Normalmente a modulação PSK (*Phase Shift Keying*) é utilizada para a transmissão de um sinal *direct sequence*, sendo o mais comum o emprego de uma constelação de 2 ou 4 símbolos, ou seja, BPSK e QPSK respectivamente.

No processo de demodulação, o sinal recebido é amplificado e sofre processo de correlação com uma cópia do código de espalhamento em fase com o código original. O sinal oriundo desta etapa é filtrado e demodulado de forma convencional.

2.4.2 Frequency Hopping.

Este método, na sua forma mais comum, se caracteriza por transmitir a informação através de saltos em frequência. Em outras palavras, trata-se de uma modulação FSK (*Frequency Shift Keying*). No entanto existe uma diferença básica entre o *frequency hopping* e o FSK tradicional. No primeiro o número de frequências utilizadas é muito grande, podendo chegar a milhares. No segundo a quantidade é pequena, normalmente apenas 2 frequências, como no caso do BFSK.

A frequência escolhida para a transmissão é determinada pelo código de espalhamento e pelo dado a ser transmitido, o que confere um caráter pseudo aleatório à transmissão.

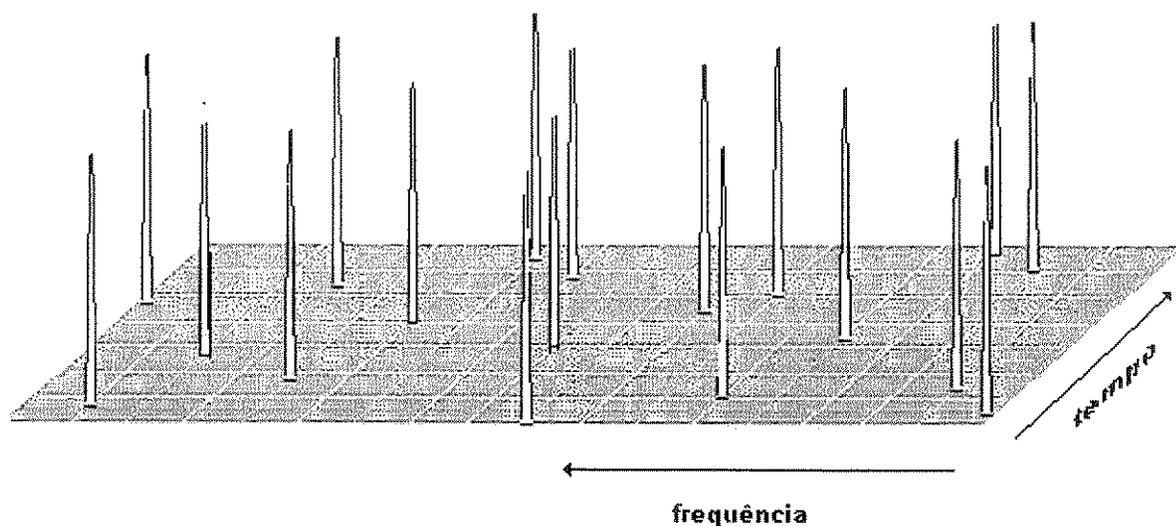


Fig.2.2 Saltos de frequência no tempo.

Diferentemente do *direct sequence*, que possui espectro de frequência instantâneo com largura igual a da banda espalhada, no *frequency hopping* o espectro

instantâneo é igual a banda da informação transmitida. Isto pode provocar ocasionalmente deteriorização do dado caso exista uma interferência em uma ou mais frequências utilizadas. O problema é mais acentuado quando o intervalo entre um salto e outro é maior do que o período do bit enviado. Neste caso, chamado de *slow frequency hopping*, a interferência pode provocar erros cíclicos em um ou mais bits a cada repetição da seqüência de espalhamento. Para minimizar este efeito usa-se o que chamamos de *fast frequency hopping*, que consiste em realizar mais de um salto em frequência por bit transmitido. Esta redundância permite que a informação seja corretamente recebida, mesmo se ocorrer forte interferência em alguma das frequências recebidas.

Anteriormente as limitações tecnológicas dos sintetizadores impediam o uso de um conjunto muito grande de frequências e os intervalos entre os saltos não podiam ser muito pequenos. Tudo isso fazia com que os ganhos de processamento fossem ínfimos se comparados aos atingidos através de *direct sequence*. A única grande vantagem do *frequency hopping* sobre *direct sequence* era a possibilidade de realizar detecção não coerente, o que barateava os custos de um receptor. Hoje em dia os sintetizadores evoluíram bastante o que permite sistemas com ganho de processamento uma ordem de grandeza maiores do que o conseguido através de *direct sequence* [7].

2.4.3 Time hopping.

Um sinal típico de time hopping é ilustrado na figura 2.3. Ele é dividido em quadros, os quais por sua vez são subdivididos em M intervalos de tempo. A mensagem é enviada em algum dos M intervalos do quadro. O intervalo a ser usado é escolhido através de uma seqüência pseudo aleatória. Se fizermos T_f = duração do quadro, T_b o período do bit, k = número de bits da mensagem em um quadro e $T_f = k \cdot t_b$, então o comprimento de cada intervalo de tempo no quadro é T_f/M e o comprimento de cada bit é T_f/kM ou simplesmente t_b/M . Assim o sinal transmitido possui uma banda $2M$ vezes mais larga do que a banda do sinal a ser transmitido

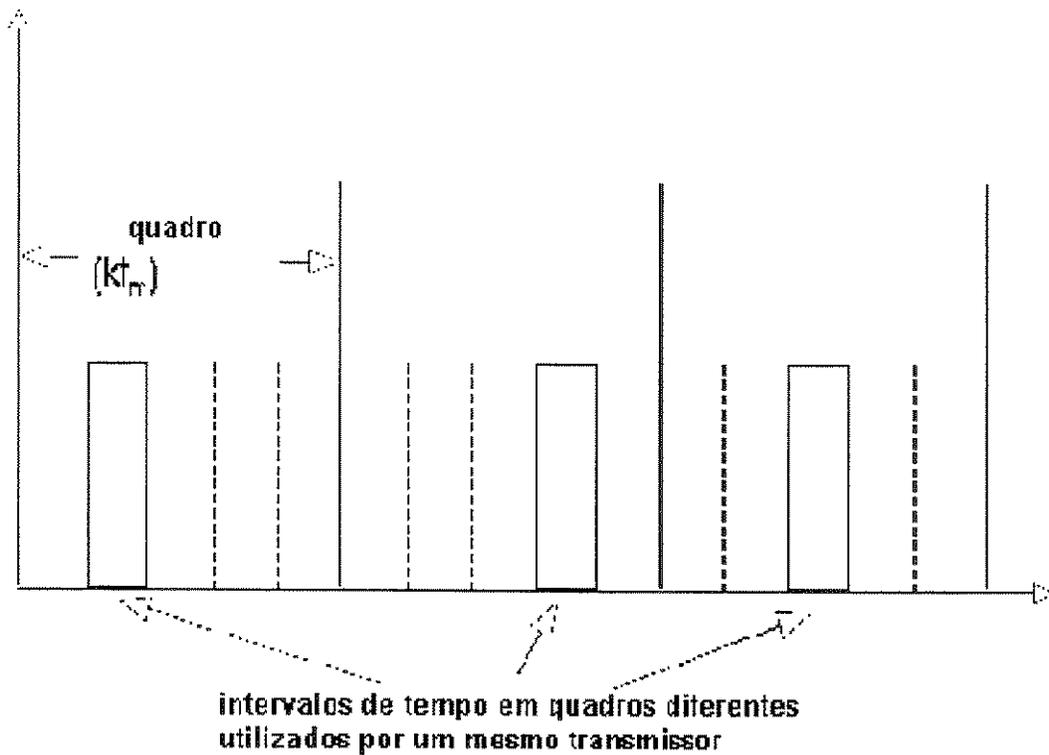


Fig.2.3 Exemplo de sinal *time hopping*.

2.5 Comparação Entre as Técnicas.

Somente três técnicas básicas de modulação para *spread spectrum* foram abordadas, no entanto existem diversas outras técnicas que não foram mencionadas uma vez que suas aplicações são mais restritas.

Como as técnicas aqui expostas são inerentemente diferentes em suas características, possivelmente a melhor forma de comparação entre elas seja através de suas vantagens e desvantagens [8].

Direct Sequence.

Vantagens:	Desvantagens:
<ul style="list-style-type: none"> • Espectro com característica de ruído, baixa densidade de potência espectral, sinal pode ser escondido entre o ruído. • Pode operar sem códigos corretores de erro. • Mais robusto do que frequency hopping e time hopping. • Suporta maior quantidade de usuários com igual potência por unidade de comprimento de banda. • Baixa interferência em sistemas convencionais de banda estreita. • Excelente qualidade de voz. • Maior resistência a múltiplos caminhos quando o atraso é maior do que período do chip. • Possui o melhor desempenho frente a interferência e a ruídos. • Maior quantidade de circuitos integrados dedicados a esta técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Controle de potência é necessário para evitar uma grande perda de desempenho em virtude do efeito <i>near-far</i>. A comunicação deve ser bidirecional para implementação do controle de potência. • Sincronização é mais difícil. Requer detecção coerente. • Receptor mais difícil de implementar do que <i>frequency hopping</i>. • Requer canal com grande largura de banda e pequena distorção de fase.

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens de DS

Frequency Hopping

Vantagens:	Desvantagens:
<ul style="list-style-type: none"> • Amplamente utilizados em redes locais sem fio, as WLANs. Cerca de 2/3 dos fabricantes de equipamentos para WLANs utilizam FH. • Melhor desempenho frente ao fenômeno <i>near-far</i>. • Maior facilidade de sincronismo. Pode ser usada detecção não coerente. • Mais fácil de implementar do que DS. • Frequências discretas podem ser retiradas se estiverem sofrendo forte interferência. • Sincronização inicial mais fácil e <i>tracking</i> pode ser conseguido por intervalos do que em DS. • Pode ser projetado de forma a ocupar faixas de espectro não contínuos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Circuitos integrados dedicados não são tão comuns. • Maior consumo de potência. • Requer códigos corretores de erro. • Deve apresentar SNR positiva. • Não tão robusto quanto DS. • Maior interferência em outros sistemas convencionais.

Tabela 2.2. Vantagens e desvantagens de FH.

Time Hopping.

Vantagens:	Desvantagens:
<ul style="list-style-type: none">• Possui a maior eficiência em aproveitamento da banda espectral entre as três técnicas.• Sua implementação é mais simples do que em FH e DS.• O efeito <i>near-far</i> pode ser totalmente evitado.	<ul style="list-style-type: none">• Possui grande tempo de aquisição.• Requer códigos corretores de erro.• Fenômeno de múltiplos caminhos exige o uso de tempos de guarda entre um <i>slot</i> de tempo e outro.

Tabela 2.3. Vantagens e desvantagens de TH.

2.6 Aplicações de Sistemas de *Spread Spectrum*.

Atualmente esta tecnologia se encontra num estágio bem avançado. No passado era usada estritamente para fins militares. Com o decorrer do tempo tornou-se disponível ao público e muitas aplicações comerciais foram desenvolvidas para *spread spectrum*. Mais recentemente suas aplicações tem chamado atenção devido às suas propriedades, as quais permitem o seu uso para operações de múltiplo acesso por divisão de código, CDMA, a superposição espectral e a disponibilidade de faixas de frequência não licenciadas para uso comercial alocadas principalmente para sistemas de espalhamento espectral. Após o lançamento das chamadas ISM *bands* em maio de 1985 pelo FCC, muitos produtos comerciais surgiram, desde alarmes contra incêndio até redes locais sem fio de alta velocidade. Hoje industrias de comunicação de voz e dados estão desenvolvendo novos produtos usando esta tecnologia.

As vantagens de usar *spread spectrum* em comunicação de voz e dados é sintetizado por Pahlavan [9] desta forma:

- Sinais de *spread spectrum* podem coexistir com outros sinais que operem na mesma banda sem que haja grandes impactos no desempenho deste ou daquele sistema.
- A característica de resistência a múltiplos percursos é atrativa em aplicações onde este fenômeno é dominante, como transmissões em ambientes urbanos.
- A resistência à interferência é importante em algumas aplicações como operação em redes, transmissão em ambientes ruidosos, tais como chão de fábrica e outros.
- Sistemas celulares desenvolvidos com a tecnologia CDMA oferecem maior flexibilidade operacional e possivelmente melhor desempenho do que outros sistemas como FDMA e TDMA.
- A existência de bandas não licenciadas é atrativa para fabricantes de produtos e para usuários.

Por estas razões muitas companhias começaram a desenvolver sistemas SS. Vários fabricantes de produtos para telefonia celular digital e comunicação pessoal (PCS) optaram pela tecnologia CDMA em detrimento às tradicionais TDMA e FDMA. Esta está se mostrando superior às demais principalmente por sua maior capacidade de usuários, transições suaves de célula para célula, aumento da confiabilidade da rede uma vez que esta não entra em colapso abrupto com o aumento do número de usuários.

Outros exemplos para aplicações em *spread spectrum* incluem: comunicações por satélites, sistema de posicionamento global GPS (*Global Positioning System*), rádio amador, redes de telemetria e outras.

Capítulo 3: Telemetria

3.1 Introdução

Como o próprio nome sugere, telemetria significa medir à distância, ou seja, realizar coleta de dados e informações de forma remota. Para muitos, telemetria significa coletar e processar dados que foram obtidos de medidas provenientes de algum local remoto, o qual pode estar a poucos metros ou a distâncias interplanetárias como no exemplo da sonda Voyager, a qual transmite dados telemétricos obtidos nos limites de nosso sistema solar. Inicialmente a telemetria tinha como principal atuação a realização de medidas referentes a posição, velocidade, aceleração, trajetória de veículos não pilotados e testes de equipamentos onde os ensaios realizados levavam a sua destruição, tais como mísseis e outros equipamentos de uso militar. Este período foi motivado principalmente devido à corrida espacial e ao desenvolvimento da indústria bélica. Posteriormente a isto os sistemas telemétricos se desenvolveram e tiveram sua utilização mais abrangente, notadamente na indústria civil, a qual experimentou grande crescimento no período pós II Guerra [10],[11].

O primeiro uso de telemetria que se tem notícia data de 1812 na Rússia. Tratava-se de um sistema utilizado em minas. Trinta e três anos após isto a telemetria já estava sendo usada para fins bélicos. Nesta aplicação um sistema foi desenvolvido para registrar e analisar o voo de uma bala de canhão. Desde então os avanços tecnológicos foram incorporados aos sistemas de telemetria tornando-os cada vez mais sofisticados. Basicamente três frentes tecnológicas definem o avanço de tais sistemas. A primeira delas é a tecnologia de sensores e de condicionamento de sinais, responsável pela captação da informação. A segunda se refere ao processamento e armazenamento da informação. Esta obteve grande impulso com o advento da tecnologia de fabricação de circuitos integrados VLSI, o que possibilitou o surgimento de dispositivos microprocessados e memórias. A terceira fronteira, a que mais nos interessa neste trabalho, diz respeito à forma como é enviada a informação desde o ponto remoto de coleta até seu destino final. Os primeiros sistemas industriais fizeram uso de fios para transmitir a informação. O uso de rádio frequência para envio de dados tornou-se largamente utilizado devido ao grande emprego

de sistemas de telemetria em testes de aeronaves e mísseis. Estas técnicas foram bastante desenvolvidas para o uso em aplicações espaciais, as quais demandam grande vazão de dados e confiabilidade. Este amadurecimento tecnológico juntamente com a produção em larga escala permitiu o uso de sistemas de telemetria através de rádio enlace.

3.2 O Sistema de Telemetria

Um sistema telemétrico tem por principal objetivo fornecer medidas de determinadas grandezas físicas de um ponto remoto. Para tanto, telemetria engloba outros campos do conhecimento tais como: instrumentação, teoria da informação, comunicações, processamento digital de sinais e outros.

Basicamente podemos dividir um sistema de telemetria em 6 subsistemas

[11]. São eles:

- subsistema de aquisição de dados;
- subsistema de armazenamento de dados;
- subsistema de multiplexagem;
- subsistema de comunicação;
- subsistema de atuação e controle;
- CPU.

3.2.1 Subsistema de aquisição de dados

O subsistema de aquisição de dados é formado pelos sensores e respectivos circuitos condicionadores de sinal. Responsável pela captação das informações através da conversão de grandezas físicas que se deseja medir em sinais elétricos devidamente condicionados.

3.2.2 Subsistema de armazenamento

Armazena temporariamente as informações adquiridas quando a transferência de dados para a estação receptora não é realizada em tempo real. Desta forma os dados coletados durante um certo período são transmitidos em intervalos determinados ou quando solicitado pela estação receptora.

3.2.3 Subsistema de multiplexagem

Em alguns sistemas de telemetria as informações provenientes dos vários canais de aquisição são multiplexadas e enviadas ao subsistema de comunicação. Esta multiplexação pode ocorrer no tempo, TDM (*Time Division Multiplexing*), ou pode ser implementada em frequência, FDM (*Frequency Division Multiplexing*). No primeiro caso os dados são ordenados em determinados intervalos no tempo selecionados para cada canal e enviados para o subsistema de comunicação para que sejam modulados e transmitidos. Já em FDM os diversos canais são modulados em subportadoras as quais, por sua vez, serão moduladas no subsistema seguinte por uma portadora principal.

Em alguns sistemas temos a combinação dos dois métodos.

3.2.4 Subsistema de comunicação

Realiza a modulação da informação recebida dos subsistemas anteriores e a transmite através de um determinado meio ou canal. Implementa, também, os protocolos de comunicação entre os pontos de coleta RTU (*Remote Terminal Unit*) e a estação receptora.

3.2.5 Subsistema de atuação e controle

Utilizado em sistemas onde além da aquisição de dados de um processo é realizado alguma forma de controle sobre o mesmo. Este subsistema pode ser formado por atuadores e *drivers* ou por PLCs (*Programable Logic Controllers*). Este bloco não é

comum em todos os sistemas de telemetria, podendo ser encontrado sobretudo em sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

3.2.6 CPU

Executa o pré-processamento dos dados adquiridos, supervisiona e controla todas as tarefas e o fluxo de dados do RTU.

3.3 Classificação dos sistemas de telemetria

Podemos classificar os sistemas de telemetria sob diversos aspectos: utilização, tecnologia usada, tipo de dado coletado. Para este trabalho o aspecto mais relevante em um sistema de telemetria é a forma de transmissão dos dados entre os RTUs e a estação de recepção, logo faremos uma classificação destes sistemas baseada neste critério.

Podemos classificar os sistemas de telemetria com relação ao meio de transmissão de dados em dois grande grupos: os que utilizam fios e os que utilizam o ar como canal de transmissão.

Pode-se, ainda, dividir estes dois grupos em sub grupos, como vemos a seguir:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| - Sistemas de transmissão com fio | 1- linha dedicada
2- linha compartilhada |
| - Sistemas de transmissão sem fio | 1- enlace terrestre
2- enlace por satélite |

3.3.1 Sistemas de transmissão com fio

3.3.1.1 Linhas dedicadas

Estes sistemas se utilizam de um par de fios para uso exclusivo, podendo ser este uma linha privada, LP, proveniente da rede de comutação telefônica ou uma linha específica implantada para o atendimento de uma determinada rede de telemetria. Podem gerar taxas médias a altas de transmissão de forma contínua, uma vez que não compartilham o meio físico com outros nós da rede. Desta forma grandes quantidades de dados podem ser transferidos sem grandes retardos. Sistemas deste tipo se prestam a realizar coleta de dados e controle em tempo real devido, como mencionado anteriormente, ao baixo atraso de transmissão. Para estas aplicações, normalmente duas ou mais LPs são utilizadas afim de aumentar a confiabilidade da rede.

Este tipo de sistema apresenta alguns inconvenientes. Entre estes podemos citar:

- o custo de manutenção das linhas privadas e/ou implantação das mesmas;
- área de cobertura da rede limitada à região de atuação da rede de comutação telefônica e da existência de LPs nos locais de interesse;
- implantação de um novo ponto da rede sujeito a instalação de LP, o que pode tornar menos flexível e ágil o reposicionamento de nós da rede.

3.3.1.2 Linhas compartilhadas

Estes tipos são semelhantes ao anterior, no entanto dividem seu meio físico, no caso o par telefônico, com um outro usuário. Na maioria dos casos este usuário é um assinante da rede de comutação telefônica. Este compartilhamento deve ser transparente ao assinante da linha, o que faz com que as transmissões de dados ocorram em momentos de ociosidade da linha telefônica e mesmo assim estas transmissões não devem se prolongar por períodos longos. Desta forma os dados são transmitidos em

rajadas, sendo a quantidade de informação que trafega na rede potencialmente menor do que no caso anterior.

Redes de coleta de dados meteorológicos se adequam muito bem ao sistema de linhas compartilhadas, uma vez que os dados colhidos por cada nó da rede são transmitidos para o concentrador da rede com intervalos grandes entre leituras, como por exemplo quatro, duas, ou até mesmo uma vez ao dia.

Este sistemas introduzem um grande retardo de transmissão, o que impede seu uso para monitoramento e controle em tempo real. Sua principal vantagem com relação aos sistemas com linhas dedicadas está no custo de manutenção muitas vezes menor. Excetuando-se este fator, este sistema está sujeito às mesmas restrições daqueles que se utilizam de linhas privadas.

3.3.2 Sistemas de transmissão sem fio

Os sistemas com transmissão de dados por enlace de rádio vêm ocupando espaços cada vez maiores, antes preenchidos por redes telemétricas a fio. No início, somente nas aplicações onde era inviável o uso de fios, quer fosse pela mobilidade do ponto de coleta de dados, ou por sua localização extremamente distante do ponto de recepção, sistemas a rádio eram empregados. A difusão do uso de redes telemétricas sem fio ocorre, entre outros fatores, devido ao barateamento dos equipamentos bem como o existência de redes de dados sem fio que podem servir como suporte para transmissão de dados de telemetria como por exemplo redes de pacotes na faixa de rádio amador, rede ARDIS, rede RAM, rede Metricom, Globalstar, o sistema celular digital, os sistemas de *pager* e outros[12].

Podemos agrupar, para fins didáticos, os sistemas de telemetria sem fio em dois blocos: redes por enlace terrestre e redes por enlace via satélite. Pertencem ao primeiro grupo os sistemas onde todos os enlaces ocorrem nas camadas mais baixas da atmosfera. São os mais comuns dentre os sistemas sem fio devido à grande quantidade de equipamentos existentes e seu baixo custo e complexidade. Se prestam para implementação de redes locais e metropolitanas. Para redes com distribuição geográfica

mais extensa, o grande número de repetidores necessários para interligação dos nós da rede pode tornar a utilização deste tipo de enlace oneroso. Para tais configurações torna-se mais indicado o uso de enlace via satélite.

A área de abrangência deste tipo de enlace está relacionada com a órbita do satélite de comunicação empregado. Assim os geoestacionários (GEOs) com órbita em torno de 36000km possuem uma área de cobertura com raio de aproximadamente 13000km. Além disto, devido sua imobilidade com relação à Terra, a área de cobertura torna-se fixa, possibilitando comunicação sem *handovers* entre pontos da rede localizados na área de cobertura. A desvantagem do uso de satélites GEO está no tempo de propagação do sinal entre um nó e outro da rede que é da ordem de 250ms.

Satélites de baixa órbita LEOs (*Low Earth Orbit*) possuem atrasos de propagação bem menores, em torno de 5ms. No entanto, sua baixa altitude faz com que sua velocidade angular seja maior do que a da Terra, logo sua área de cobertura, embora de tamanho fixo, varia de posição a cada instante. Um determinado nó só poderá se comunicar com um satélite específico durante uma janela de tempo de alguns minutos. Para transmissões contínuas é necessária uma rede de satélites interligados, causando freqüentes *handovers* durante transmissões longas, ocasionando diminuição da eficiência do sistema.

Alguns sistemas meteorológicos de telemetria utilizam satélites de baixa órbita para transmissões de dados entre o RTU e a estação concentradora de dados. Assim a cada passagem do satélite o RTU transmite seus dados, sendo os mesmos retransmitidos para a estação quando esta estiver sob a área de cobertura.

Podemos destacar o custo como principal desvantagem dos sistemas de telemetria com enlace por satélite. O aluguel de um canal de satélite somente para este fim pode tornar o sistema bastante caro. Uma solução seria a utilização de outras redes que se utilizem de enlaces via satélites já existentes como suporte para uma rede telemétrica.

A principal vantagem destes sistemas está na grande área de cobertura, alcançando inclusive regiões ermas onde seria inviável o uso de outras soluções.

3.4 Vantagens de um sistema de telemetria sem fio sobre um sistema convencional

Em ambientes urbanos os sistemas de telemetria tradicionalmente vêm utilizando dois meios de transmissão de informação entre os pontos de coleta de dados e o ponto concentrador destas informações: as linhas privadas e rádios FM.

No primeiro caso temos como grande problema o custo de operação de um sistema que utiliza cabos de cobre para transmissão de dados. Caso a região de abrangência de uma rede de telemetria seja atendida por uma rede de comutação telefônica este custo decresce bastante, uma vez que já existe um suporte operacional instalado. Mesmo assim a taxa de manutenção de uma LP é considerável, podendo tornar oneroso a utilização de uma rede deste tipo.

Um outro problema observado é a vulnerabilidade dos cabos telefônicos com relação a variáveis ambientais e outros fatores externos. Não raro, em dias de tempestade, descargas elétricas atingem a rede, destruindo parte da cabeção e, em alguns casos, danificando os equipamentos em suas extremidades. Além deste, vários outros tipos de acidentes podem ocorrer interrompendo a comunicação entre alguns nós da rede.

No segundo caso temos como problema o congestionamento das faixas de frequência permitidas para transmissão de dados telemétricos e voz. Nos EEUUs o FCC disponibiliza para esta finalidade as faixas de 150 a 173 MHz, de 450 a 800MHz e 900Mhz. Nas grandes cidades estas faixas já se encontram perto do seu limite de utilização, o que faz com que o licenciamento de equipamentos para uso nestas faixas se torne caro.

3.4.1 Spread Spectrum

Os problemas apontados anteriormente nos dois casos podem ser solucionados pela utilização de *spread spectrum*. As desvantagens listadas no uso de fios como meio de transmissão obviamente não se aplicam a um sistema de telemetria em SS. Por outro lado, a questão do congestionamento do espectro nas faixas destinadas a telemetria usando modulação convencional também não se aplica a sistemas SS. Estes, por sua vez, são empregados nas faixas ISM e, portanto, não estão sujeitos à licenciamento, o que diminui os custos dos equipamentos. Além disto, as características inerentes ao espalhamento espectral permitem a convivência de vários sistemas semelhantes ocupando a mesma banda, desde que os níveis de interferência multiusuário se mantenha em patamares aceitáveis.

Com relação a este último aspecto, vários estudos têm sido realizados no sentido de quantificar e qualificar os efeitos do compartilhamento de redes em SS com redes de telemetria convencionais. Um trabalho muito interessante nesta área foi desenvolvido por Takana, Kyoso e Uchuyama [13]. Esta pesquisa abordou os efeitos da coexistência de sistemas médicos de telemetria convencionais e sistemas utilizando SS em ambientes hospitalares. Devido às características deste tipo de sistema, ou seja, presença de várias fontes de interferência eletromagnética (aparelhos de raios X, cardioversores e outros), necessidade de alta confiabilidade dos dados transmitidos, mobilidade dos equipamentos entre outras, os resultados obtidos são bastante representativos, uma vez que o conjunto de qualidades que tornam um sistema SS atrativo é avaliado como um todo.

As conclusões atingidas neste trabalho foram que:

- o sistema de telemetria em SS se mostra bastante robusto com relação à presença de interferência produzida por outros sistemas de telemetria e pela presença de *jammers*;
- o sistema em SS não interfere nos sistemas convencionais que utilizam a mesma faixa de frequência, podendo estes compartilharem o mesmo ambiente;
- a potência de transmissão inferior, quando comparado a sistemas convencionais, para uma mesma taxa de erro de bit.

3.4.1.1 Custo de implantação X custo de manutenção

A implementação de uma rede metropolitana de telemetria usando SS requer um investimento alto, o que pode desestimular sua utilização. No entanto com este tipo de rede o custo com manutenção é muito baixo, principalmente se compararmos ao custo de manutenção de uma rede que utilize linhas privadas, a qual demanda aportes financeiros periódicos e elevados.

Para exemplificar a afirmação anterior citaremos o caso da cidade de Olympia, EEUU[14]. O departamento de água e esgotos desta cidade utilizava linhas alugadas como meio de transmissão para sua rede de telemetria o que representava um custo anual de manutenção de cerca de \$60.000,00 a \$70.000,00. Acrescente-se a isto problemas constantes de comunicação entre pontos da rede. O referido departamento avaliou a possibilidade do uso de um sistema sem fio e decidiu pela utilização de uma rede em SS. Após um ano de funcionamento observou-se que além do aumento da confiabilidade da rede o investimento de implantação da rede apresentou um *Pay back* de aproximadamente um ano e meio, o que comprova sua atratividade financeira quando comparado ao sistema anterior.

3.5 Considerações finais

Procuramos neste capítulo realizar uma breve avaliação dos diversos sistemas de telemetria sob o ponto de vista de transferência de dados. Buscamos enfatizar as vantagens de um sistema baseado em transmissão de dados em *spread spectrum* sobre as demais alternativas para o uso em redes metropolitanas.

No capítulo seguinte iremos abordar os diversos tipos de protocolos de acesso ao meio, avaliando aquele que mais se adequar ao sistema de telemetria por nós proposto.

Capítulo 4: Controle de Acesso ao Meio

4.1 Introdução

Neste capítulo iremos abordar a forma como o canal será compartilhado com vários usuários, RTUs. Inicialmente iremos comentar sobre os vários métodos existentes para fazê-lo, analisando a factibilidade de implementação de cada protocolo para uma rede de telemetria. Após isto faremos a análise de vazão de rede e confiabilidade para o protocolo de controle de acesso ao meio escolhido para a rede de telemetria.

Os protocolos de controle de acesso ao meio, MAC (*Medium Access Control*), ditam quem e em que momento terá acesso ao canal de comunicação para que sejam evitados a superposição de pacotes e a eventual degeneração e perda das informações neles contidas. O MAC ocupa uma subcamada da camada de enlace de dados do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) composto de sete camadas.

Vários protocolos MAC existem com determinadas características para otimizar um determinado tipo de dado e aplicação. Desta forma temos protocolos específicos para tráfego de dados onde é permitido atraso em sua transmissão, porém a taxa de erro deve ser pequena, assim como temos protocolos para tráfego de voz que possui características opostas ao anterior, ou seja, permite certa taxa de erro, mas não tolera atraso de transmissão.

As figuras de mérito mais usadas para qualificar um protocolo de controle de acesso ao meio são tempo médio de atraso e vazão média. Primeiramente é necessário definir o que significam estas figuras de mérito.

Tempo médio de atraso é o tempo que leva em média um pacote após ser gerado para chegar ao receptor com sucesso, ou seja, é o tempo que um pacote após chegar à fila de transmissão leva para ser recebido com sucesso. Vazão média da rede é a razão entre o tráfego que é recebido com sucesso e a máxima capacidade de transmissão do canal. Este parâmetro nos permite avaliar a ocupação do canal e se o mesmo está sendo usado de forma ótima ou não, em outras palavras, nos diz o quão eficiente é o MAC.

4.2 Redes sem fio

Redes que utilizam rádio enlace operam sujeitas a restrições com relação a interferência que podem causar no ambiente. Desta forma os canais de frequência são distribuídos de modo a suportar o grande número de usuários de vários tipos de redes sem fio, sobretudo as redes de comunicações móveis. Uma pequena faixa de frequência está designada para transmissões não licenciadas em *spread spectrum*

A escassez de banda disponível e a grande quantidade de usuários compartilhando este recurso faz com que a probabilidade de transmissões superpostas aumente. Em redes que utilizam cabos e/ou fios como meio de transmissão a ocorrência destas colisões acarreta em perda dos pacotes envolvidos. Em redes sem fio a ocorrência deste fenômeno não implica necessariamente na corrupção de todos os pacotes[12]. Quando ocorre a colisão temos uma diminuição da razão sinal/ruído. Se esta relação permanecer acima de um determinado limiar o receptor terá grande probabilidade de recuperar a informação do pacote através do processo que chamamos de captura.

O processo de captura é evidenciado quando os sinais provenientes dos nós da rede chegam ao receptor com níveis diferentes de potência, sobretudo devido às diferentes distâncias entre cada nó e o receptor, o que proporciona o efeito *near-far*. A captura oferece um aumento de desempenho da rede com relação a vazão de dados, uma vez que há um acréscimo no número de pacotes recebidos com sucesso diminuindo a quantidade de retransmissões de pacotes perdidos por colisão. Alguns MACs, sobretudo os distribuídos e baseados em contenção, fazem uso deste processo para aumentar a vazão da rede e garantir que pacotes com maior prioridade sejam recebidos com menor retardo. No entanto, devido ao efeito *near-far*, se não houver um controle de potência nos transmissores, nós nas proximidades do receptor terão maior probabilidade de transmitir com sucesso seus dados quando comparados com aqueles localizados a maiores distâncias. Isto se configura como um esquema de prioridade, que em muitos casos é indesejável por comprometer a equidade da rede.

4.3 Classificação dos Protocolos de Controle de Acesso

Cada protocolo MAC é criado para satisfazer certas características e necessidades de determinadas aplicações, como complexidade, carga ofertada à rede, tolerância a erro e retardo na transmissão, tipo de tráfego e outros. A partir destas características podemos classificá-los sob dois aspectos: controle da rede e existência ou não de reserva.

Nos protocolos baseados em reserva os nós que desejam transmitir disputam entre si os recursos do sistema para garantir o envio de suas mensagens. Aqueles nós vencedores terão alocados para si recursos que garantirão a transmissão sem conflitos com as demais estações. Já nos protocolos baseados em contenção, os usuários que desejam obter acesso ao canal ao fazê-lo não terão maiores garantias que suas transmissões estarão livres de conflitos, desta forma alguns pacotes deverão ser perdidos, devendo, assim, existir um esquema de retransmissão destes.

Com relação ao controle da rede MACs podem ser distribuídos ou centralizados. No primeiro caso cada nó da rede tem conhecimento e obedece a um mesmo conjunto de regras que disciplinam a rede. No segundo, um ponto de acesso tem conhecimento das características dos nós da rede e realiza a arbitragem ao acesso, alocando os recursos aos nós de acordo com a necessidade. Em geral a maioria dos esquemas centralizados evita a ocorrência de conflitos ou colisões uma vez que o canal é alocado estatisticamente ou dinamicamente para cada nó em determinado intervalo de tempo.

Em esquemas centralizados quando o tráfego gerado por um nó ocorre em rajadas, haverá momentos em que será alocado o canal para este e o mesmo não possuirá informações para transmitir, causando uso ineficiente da banda do canal. Por outro lado, o tráfego de informação não tolerante a retardo sofrerá grandes problemas em esquemas distribuídos devido à latência aleatória introduzida pela retransmissão de pacotes, uma vez que a maioria destes protocolos são baseados em contenção.

Podemos notar, então, que MACs centralizados são otimizados para tráfego de dados periódicos e não tolerantes a retardos aleatórios tais como voz e vídeo, enquanto que os esquemas distribuídos se aplicam melhor para tráfego de dados em rajadas.

4.3.1 Sistemas Centralizados

Alguns exemplos de métodos centralizados e com reserva são: CDMA, TDMA, FDMA e *Polling*. Neste métodos a colisão de pacotes é evitada através da reserva de código, tempo, e frequência para cada nó que deseja transmitir.

4.3.1.1 CDMA

É usado em sistemas *spread spectrum* onde para cada nó é assinalado uma seqüência de espalhamento ortogonal com relação aos códigos de outros nós. A ortogonalidade das seqüências de espalhamento permite ao receptor demodular a informação de cada pacote, mesmo que haja várias transmissões simultâneas. À medida que o número de nós cresce é necessário utilizar seqüências de espalhamento mais longas para que seja possível obter um conjunto maior de códigos ortogonais. Na prática os códigos não são totalmente ortogonais, o que faz com que haja uma interferência decorrente das transmissões múltiplas. Ao passo que aumenta o número de usuários e conseqüentemente a quantidade de transmissões simultâneas há uma degeneração gradativa do desempenho da rede.

A principal desvantagem com relação a este método está na complexidade exigida para sua implementação, sobretudo no receptor o qual terá de ser capaz de demodular várias transmissões ao mesmo tempo. Para uma rede de telemetria em que ocorra tráfego intenso e contínuo em seus nós é aplicável este MAC.

4.3.1.2 FDMA

Em FDMA o nó que arbitra a rede divide a banda de frequência em vários sub canais. A cada nó que deseja transmitir é alocado um sub canal que será usado por este até o fim de sua transmissão. Quando o número de nós é grande e varia continuamente ou o tráfego gerado é em rajadas, FDMA se torna não muito eficaz. O nó controlador divide a banda em N sub canais e se apenas X usuários, onde $X < N$, estiverem transmitindo os sub canais restantes ficarão ociosos, mesmo se um dos nós necessitar de maior banda para dar

vazão à quantidade de dados gerados. Por outro lado se mais de N nós requisitarem permissão para transmitir apenas N terão acesso ao canal, enquanto que os demais terão que esperar a liberação de algum sub canal. Por isto FDMA não é atrativo para tráfego de dados, o qual ocorre geralmente em rajadas. De fato o tempo de retardo médio é N vezes maior do que se cada nó usasse toda a banda disponível e transmitissem de forma ordenada, ou seja, um por vez[12]. Com relação à implementação, O FDMA apresenta menor complexidade do que sistemas CDMA e TDMA, o que faz seu custo ser menor, todavia sua utilização está restrita quase que exclusivamente a tráfego de voz em sistemas celulares analógicos.

4.3.1.3 TDMA

Em TDMA o canal é compartilhado entre os nós que desejam transmitir através da alocação de intervalos de tempo para cada nó. Em cada intervalo de tempo apenas um transmissor pode ter acesso ao canal usando toda a banda disponível. Os demais transmissores deverão esperar o intervalo de tempo assinalado para cada um. Desta forma o tempo é dividido em quadros que por sua vez são divididos em N intervalos, *slots*, cada *slot* é designado para um nó da rede permitindo N transmissões “simultâneas”. Para aumentar a quantidade de usuários que podem ter acesso ao canal ao mesmo tempo poderíamos pensar em acrescer o número de *slots* por quadro. No entanto isto aumentaria o tamanho do quadro e por conseguinte o atraso observado por cada nó, o que tornaria o tráfego de dados não tolerantes a retardo impraticável.

Para evitar interferência de um slot em outro devido aos diferentes atrasos de propagação sofrido pelas ondas de rádio ao percorrerem vários percursos (efeito de múltiplos percursos), é colocado um tempo de guarda separando os *slots* entre si. Este tempo será maior quanto maior for a área de cobertura da rede. O *overhead* introduzido pelo tempo de guarda cresce à medida em que se aumenta o número de *slots*, o que pode tornar este MAC ineficaz nesta circunstâncias.

Este protocolo requer esquemas de sincronização muito precisos uma vez que todos os nós devem reconhecer o início e o final de cada *slot*, bem como o *slot*

designado para si. Pequenas diferenças nesta sincronização podem levar a colisões e conseqüentemente perda de dados.

Algumas redes de telemetria utilizam este MAC, sobretudo quando altas taxas de dados não tolerantes ao retardo são gerados, como por exemplo, imagens. Fabricantes de rádios com tecnologia *spread spectrum* como FreeWave e Utilicom, fornecem equipamentos que implementam este protocolo.

4.3.1.4 *Polling*

É um protocolo altamente centralizado onde o ponto de acesso consulta cada nó sobre a existência de dados a serem transmitidos e suas características. Somente após isto a permissão para transmitir é enviada para os nós de acordo com uma determinada política. Uma das táticas usadas é o nó enviar, ao ser solicitado pelo ponto de acesso, informação sobre o tempo de vida de cada pacote. Quanto menor for este tempo maior será a prioridade de transmissão deste pacote.

Alguns autores [15] consideram que em sistemas centralizados, *polling* pode ser mais eficiente do que TDMA. Sua implementação é mais simples uma vez que não requer sofisticados esquemas de sincronização.

4.3.2 Sistemas Distribuídos

Sistemas onde o tráfego se caracteriza por uma alta razão entre taxa de pico e taxa média de dados e as rajadas ocorrem de forma imprevisível no tempo sofrem perda de eficiência quando operam sob MACs centralizados. De fato MACs distribuídos tradicionalmente são usados para comportar este tipo de tráfego.

Veremos a seguir alguns dos principais protocolos distribuídos.

4.3.2.1 Aloha

É o protocolo mais simples de implementação. Cada nó transmite no momento em que há dado disponível, sem que exista qualquer tipo de sincronização com outros nós da rede. Neste método ocorrem colisões sempre que um ou mais usuários transmitirem enquanto outro nó não tenha finalizado sua transmissão, mesmo que a superposição seja pequena. Quando o tráfego ocorre em rajadas e a carga oferecida à rede é baixa a existência de colisões é rara. O método mais usado para garantir a confiabilidade da rede é o envio de mensagens de reconhecimento de pacote recebido pelo receptor. Desta forma os nós ao transmitirem seus pacotes esperam durante um tempo T por uma mensagem do receptor indicando recebimento. Caso não haja envio desta mensagem o pacote é retransmitido. O tempo T de espera é aleatório de forma a minimizar a ocorrência de novas colisões dos pacotes retransmitidos.

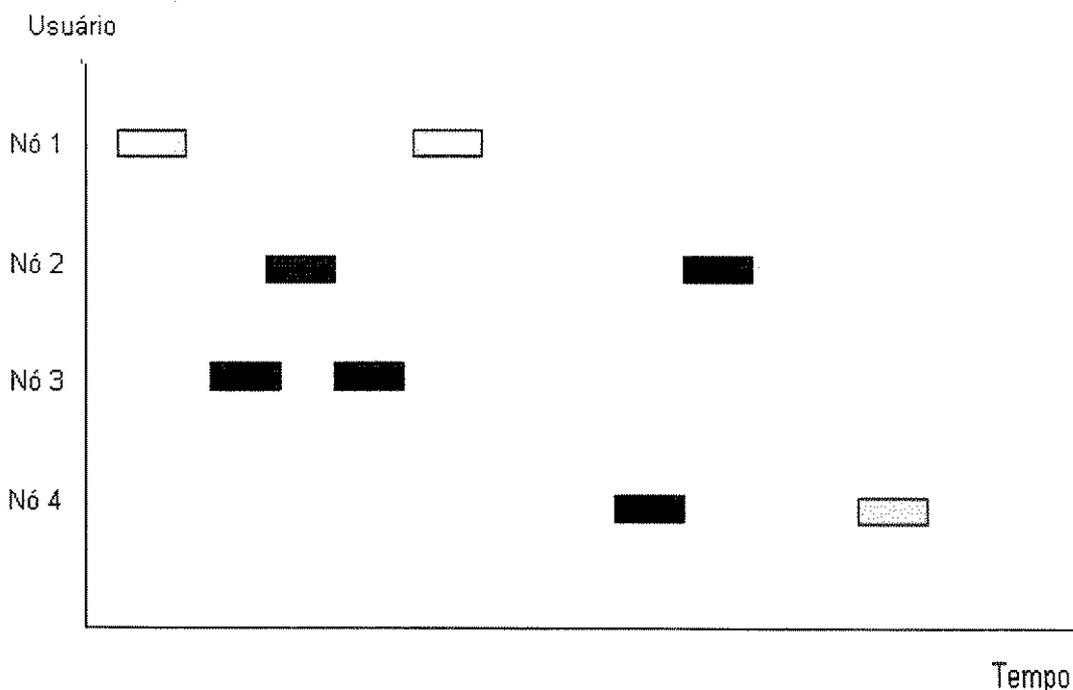


Figura 4.1. Colisões em *unslotted aloha*. Pacotes escuros representam colisões.

O desempenho do protocolo *aloha* pode ser melhorado fazendo-se algumas considerações. Uma delas é fazer todos os pacotes de igual tamanho. Outra consideração seria minimizar ao máximo o tempo de vulnerabilidade do pacote transmitido. Em *aloha* tradicional, (*unslotted*), o pacote poderá sofrer colisão desde o início até o final de sua transmissão. Isto decorre da total falta de sincronização deste protocolo. Se fizermos com que as colisões somente ocorram no começo de cada transmissão, o que equivale a sincronizar o início do envio, teremos um desempenho duas vezes maior, no caso de desprezarmos o efeito de captura, do que o *unslotted aloha*, como poderemos ver através do modelamento a seguir.

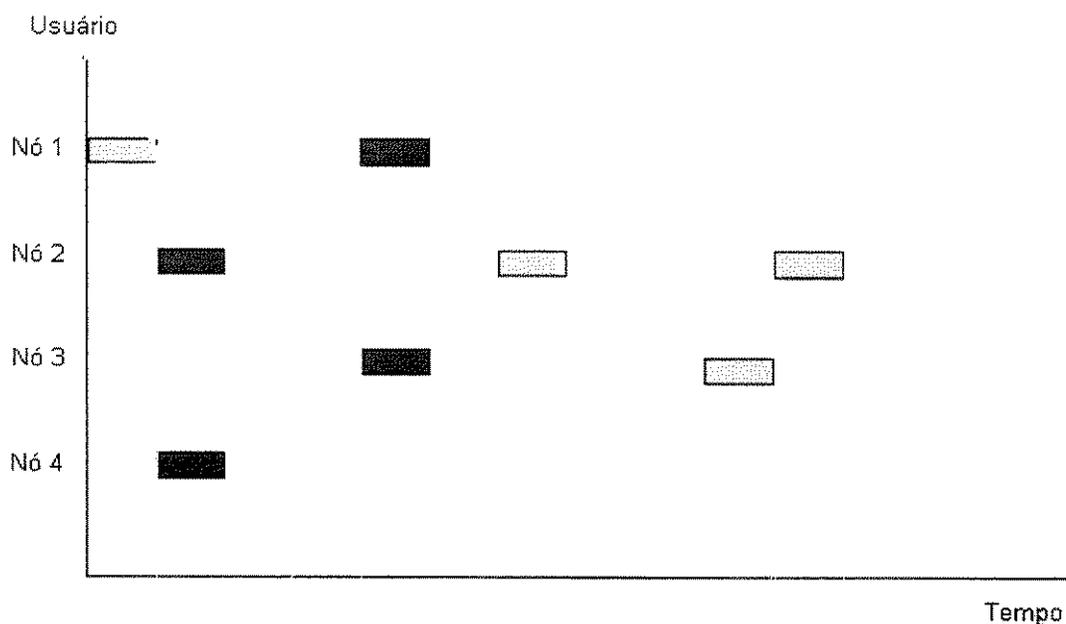


Figura 4.2. Colisões em *slotted aloha*. Pacotes escuros sofreram colisões.

Tradicionalmente o protocolo *aloha* é modelado considerando a existência de infinitos usuários, o que garante que a carga ofertada à rede permaneça constante, a geração de pacotes obedece a uma distribuição de Poisson com taxa média de λ pacotes gerados por unidade de tempo e carga ofertada à rede $G = \lambda T$, onde T é o tamanho do pacote. A vazão S é definida como a porcentagem de pacotes transmitidos com sucesso e é

determinada pelo produto entre a carga ofertada, G , e a probabilidade de sucesso, P_s , de transmissão, $S = G.P_s$. A probabilidade de sucesso em *aloha* significa que nenhum dos demais nós transmitirão enquanto um determinado nó realiza sua transmissão. Para que isto ocorra nenhum pacote deve ser gerado durante o tempo de susceptibilidade, o que equivale a nenhum pacote gerado durante o intervalo $2T$, isto porque a colisão pode ocorrer em qualquer momento da transmissão e não somente no seu início. Pela distribuição de Poisson temos que a probabilidade de k pacotes serem gerados no intervalo t é:

$$P(k,t) = \frac{\lambda \cdot t \cdot e^{-\lambda t}}{k!} \quad (1)$$

fazendo $k = 0$ e $t = 2T$ temos:

$$P_s = e^{-2G} \quad (2)$$

logo a vazão será:

$$S = G \cdot e^{-2G} \quad (3)$$

que possuirá valor máximo de aproximadamente 0,18 em $G = 0,5$.

Dividindo-se o tempo em intervalos iguais a T e fazendo com que as transmissões ocorram somente no início de cada intervalo estaremos reduzindo pela metade o tempo de vulnerabilidade do pacote. Neste caso a vazão será:

$$S = G.P(0,T) = G \cdot e^{-G} \quad (4)$$

que terá valor máximo de aproximadamente 0,36 em $G = 1$. Apartir deste valor de G a vazão decresce exponencialmente. Isto porque a probabilidade de um pacote não sofrer colisão é e^{-G} , logo a probabilidade de um pacote ser transmitido com sucesso na n -ésima tentativa é:

$$P_n = e^{-G} \cdot (1 - e^{-G})^{n-1} \quad (5)$$

O valor esperado de tentativas será:

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} nP_n = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot e^{-G} (1 - e^{-G})^{n-1} = e^G \quad (6)$$

logo o número de tentativas necessárias aumenta exponencialmente com G.

Este modelamento é válido se considerarmos a perda dos pacotes envolvidos na colisão. Um modelamento que pressupõe a possibilidade de captura para sistemas *spread spectrum* será apresentado posteriormente neste capítulo.

Como podemos observar *aloha* apresenta desempenho fraco para altas cargas ofertadas à rede, no entanto torna-se atraente para pequenas cargas devido sua grande simplicidade de implementação, sobretudo no caso de *unslotted aloha*.

4.3.2.2 Aloha com Reserva

Este método objetiva aliar as vantagens de *slotted aloha* e TDMA. O processo de transmissão de pacotes é dividido em duas fases. Na primeira, chamada de fase de reserva, os nós que pretendem obter acesso ao canal enviam pacotes de solicitação de transmissão. Nesta fase o controle de acesso ao meio usado é o *slotted aloha*. O nó após transmitir seu pacote de solicitação, o qual é muitas vezes menor do que o pacote de dados, espera por uma resposta do nó para onde deseja transmitir. Neste pacote de resposta há um ou mais *slots* de dados alocados para o nó solicitador. Caso não receba nenhuma resposta, ou porque seu pacote de solicitação foi corrompido por colisões ou porque não havia *slot* disponível, o nó deverá esperar uma nova fase de reserva. Após finalizada esta fase dá-se início à fase de transmissão. Cada nó atendido na fase anterior transmitirá no(s) *slot(s)* designado(s) para si.

O número de *slots* na fase de reserva deve ser grande o suficiente para manter a probabilidade de colisões baixa, mas não pode ser tal que aumente significativamente o *overhead*. Projetistas normalmente utilizam a razão de três *slots* na fase de reserva para cada *slot* na fase de transmissão.

4.3.2.3 CSMA

O CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) consiste em “ouvir” o canal antes de transmitir e só fazê-lo caso o canal esteja ocioso. Isto reduz bastante a probabilidade de colisões quando comparado ao *aloha* e conseqüentemente aumenta a vazão da rede.

Existem várias estratégias de implementação de CSMA, entre elas: 1-persistente CSMA, não persistente CSMA, p-persistente CSMA, CSMA/CD e CSMA/CA.

Em 1-persistente CSMA os nós que desejam transmitir esperam até que o canal fique ocioso e transmitem imediatamente após isto. Se houver mais de um nó disputando o canal haverá, então, colisões. Já em não-persistente CSMA o nó “ouve” o canal e se estiver ocupado o nó esperará por um tempo aleatório e voltará a “escutar” o canal, repetindo este processo até que obtenha acesso ao meio. Este método produz melhora na vazão da rede, mas pode aumentar o retardo de transmissão de um pacote quando comparado ao método anterior.

Em p-persistente CSMA temos um sistema onde o tempo é dividido em intervalos e cada nó “escuta” o canal no início de cada intervalo e caso o mesmo esteja ocioso o nó transmitirá com probabilidade p e com probabilidade $1-p$ aguardará o próximo intervalo e repetirá o processo.

As estratégias mais usadas, no entanto, são CSMA/CD (*CSMA with Collision Detect*) e CSMA/CA (*CSMA with Collision Avoidance*). A primeira é utilizada principalmente em redes a fio, sobretudo no padrão ETHERNET. Neste MAC o nó envia seus dados e simultaneamente “escuta” o canal. Desta forma, caso ocorra uma colisão os nós envolvidos abortarão suas transmissões, reduzindo drasticamente o tempo perdido em tráfego não útil.

A método CSMA mais adotado para redes sem fio é o CSMA/CA. Neste MAC é adotada uma estratégia para evitar a ocorrência de colisões, a qual pode variar de acordo com o fabricante e a rede. Alguns métodos mais comuns são *exponential-backoff*, RTS-CTS. O algoritmo mais usado é o seguinte: depois de cada transmissão com ou sem colisão, a rede entra em um modo onde as estações só podem começar a transmitir em intervalos de tempo a elas pré alocados. Ao findar uma transmissão, o nó alocado ao

primeiro intervalo tem o direito de transmitir sem probabilidade de colisão. Se não o faz, o direito passa à estação alocada ao segundo intervalo e assim sucessivamente até que ocorra uma transmissão, quando todo o processo se reinicia. Se todos os intervalos não são usados, a rede entra em um estado onde um método CSMA comum é utilizado para acesso, podendo ocorrer colisões.

Em redes sem fio o CSMA não possui o mesmo desempenho apresentado em redes convencionais a fio. Ao usar o canal o nó precisa transmitir por duas vezes o maior tempo de propagação para que tenha certeza que não tenha ocorrido colisão. Em redes locais onde a área de cobertura esteja restrita a um raio de 50m o tempo de propagação de ida e volta para o maior percurso possível é da ordem de 600ns. Este tempo é pequeno o suficiente para não comprometer a eficiência do método, porém quando falamos de redes metropolitanas, onde a área de cobertura de uma célula é da ordem de centenas de metros a quilômetros, este tempo pode atingir valores em torno de 15us. No entanto o maior problema de CSMA em redes sem fio não é este e sim a existência de nós escondidos, ou seja, nós que não são percebidos por outros nós da rede. Isto pode provocar colisões de pacotes enviados pelos nós escondidos com os pacotes emitidos por outros nós que não percebendo a existência de uma transmissão em progresso acabam por interpretar isto como ociosidade do canal.

No caso de CSMA/CD temos, ainda, um outro problema. Como o nó precisa “ouvir” o canal enquanto transmite, afim de identificar a existência de colisões, este estará monitorando o seu sinal e os eventuais sinais de outros transmissores. Devido ao efeito *near-far*, o seu próprio sinal será percebido com potência muito maior do que os sinais de outros nós, dificultando a detecção de colisões.

4.3.2.4 RTS-CTS

O problema de nós escondidos pode ser reduzido através da aplicação de um método conhecido como RTS-CTS (*Request to Send – Clear to Send*) acoplado a um CSMA. Este método consiste em fazer o nó que deseja transmitir ao identificar a ociosidade do canal enviar um pequeno pacote, o RTS, solicitando ao nó de destino

permissão para enviar dados, este ao receber a solicitação responde com outro pequeno pacote, o CTS, atendendo à solicitação, após isto tem se início a transmissão. Desta maneira os nós, os quais podem “escutar” a estação que enviou o RTS, saberão que o canal está ocupado ao detectarem o pacote de solicitação. Em contrapartida, os nós que não percebem a estação solicitante, mas podem detectar a estação concedente, saberão da utilização do canal através do reconhecimento do pacote CTS.

4.4 Escolha do Protocolo de Acesso ao Meio

Para definirmos o MAC usado para uma rede de telemetria, antes de tudo, é preciso determinar as características que compõem esta rede. Os parâmetros mais relevantes são:

- natureza dos dados que circulam pela rede;
- tipo de tráfego gerado;
- nível de confiabilidade requerido;
- complexidade dos nós.

Com relação à natureza dos dados podemos ter dados não tolerantes ao retardo de transmissão e dados tolerantes, bem como dados tolerantes a erro e não tolerantes. A respeito do tráfego podemos ter tráfego periódico ou em rajadas. O nível de confiabilidade requerido pelo sistema diz respeito à tolerância do mesmo à ocorrência de perda ou corrupção de informação que trafega pela rede. A complexidade do nó está vinculada a capacidade do mesmo em executar tarefas e implementar protocolos mais sofisticados. Existe uma relação direta entre complexidade e custo, uma vez que a primeira demanda por *hardware* e *software* também mais sofisticados.

Na grande maioria das aplicações os sistemas de telemetria operam com dados de banda estreita e geram tráfego intermitente. Não queremos dizer com isso que inexistam sistemas que trabalhem com altas taxas de dados e fluxo contínuo, como por exemplo sistemas de sensoriamento remoto, os quais trabalham com imagens que são geradas em intervalos definidos e que demandam grande banda espectral para transmissão

destes dados. No entanto não levaremos em conta este tipo de sistema por se tratar de uma aplicação bem específica.

Os dados gerados podem ou não ser sensíveis ao retardo de transmissão bem como à existência de erros. Isto dependerá do tipo de aplicação. Em sistemas de coleta de dados meteorológicos, por exemplo, os dados podem sofrer atrasos aleatórios bem como suportam taxas de erro mais elevadas, os quais devido sua dinâmica lenta podem ser facilmente corrigidos através de filtragens nos bancos de dados gerados. Em contrapartida, nos sistemas de coleta de dados e supervisão, baixos atrasos e taxas de erro são esperados. Vamos supor que os dados tolerantes a certo atraso de transmissão sejam predominantes na rede.

Em uma rede de telemetria, sobretudo uma rede metropolitana, é extremamente desejável que o custo dos RTUs seja baixo. Para tanto, torna-se necessário simplificar os protocolos nos diversos níveis de rede.

Partindo destas premissas deduzimos que o protocolo de acesso ao meio que mais se adequa às necessidades colocadas é o *aloha*. Resta-nos decidir por *slotted* ou *unslotted aloha*.

Enquanto existe uma relação de 2:1 entre a vazão de *aloha slotted* e *unslotted* em sistemas convencionais, em CDMA o decremento de vazão que obtemos entre o *aloha slotted* e sua versão *unslotted* é da ordem de 10 a 30% somente [16]. Logo o aumento de complexidade exigido para realizar o sincronismo requerido em *slotted aloha* não compensa o ganho de vazão a ser obtido. Se levarmos em conta o *overhead* causado por *slots* não utilizados e o tráfego de pacotes de tamanhos diferentes, o *unslotted aloha* pode, em alguns momentos, ser preferível, mesmo do ponto de vista de capacidade.

Baseado no exposto acima faremos agora uma análise de uma rede *spread spectrum* cujo MAC é o *unslotted aloha*.

4.5 Análise de Vazão de uma Rede *Spread Spectrum* utilizando *Unslotted Aloha* como Método de Acesso ao Meio.

Redes sem fio de pacotes baseadas no uso de *spread spectrum* têm obtido bastante atenção devido sua utilização em sistemas de comunicação móveis, redes locais de computadores, rádio amador e outras. Isto, basicamente, deve-se a sua capacidade de implementar acesso por divisão de código, o CDMA, seu potencial de alcançar grandes desempenhos com relação à vazão de dados e a baixa potência necessária nos transmissores. Desta forma, muita literatura tem sido devotada à análise de desempenho de redes de pacotes usando *spread spectrum* [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]. No entanto, a maior parte das contribuições neste campo está restrita a modelos que utilizam como forma de acesso ao meio o *slotted aloha*. Neste esquema, o tempo é dividido em pequenas porções, *slots*, onde os transmissores integrantes da rede só poderão iniciar sua transmissão ao início de cada intervalo, slot. Cada intervalo será a soma do tempo de transmissão de cada pacote mais um tempo de guarda para evitar que o efeito de múltiplos caminhos faça com que um pacote enviado no intervalo anterior cause interferência no intervalo atual. Este tempo está diretamente relacionado com o tempo de coerência do canal, o qual, por sua vez, depende das condições de propagação dos sinais de rádio. Assim para ambientes urbanos densamente povoados possuem tempo de coerência diferente do que aquele apresentado por ambiente rurais. Neste modelo a interferência é constante durante a transmissão de cada pacote, o que torna a análise de desempenho muito simples uma vez que a probabilidade de erro em um bit é função, também, da quantidade de interferência sofrida. Desta forma o sucesso de cada transmissão depende do número de pacotes simultaneamente enviados.

Em uma rede de telemetria alguns fatores determinam a escolha e o projeto dos transmissores. Dois deste fatores são custo e tamanho. Desta forma o protocolo de acesso ao meio a ser usado não deve demandar maior complexidade por parte dos transmissores. Assim sendo, escolheremos o protocolo mais simples de ser implementado, o *unslotted aloha*. Neste esquema, cada ponto da rede transmite um pacote assim que este esteja disponível para tal. Nenhum tipo de sincronismo preciso ser feito, o que torna sua implementação bastante simples. No entanto o modelamento para análise de desempenho

não é tão simples, uma vez que o nível de interferência não é constante durante a transmissão de cada pacote. Ocorrem flutuações no número de pacotes interferentes em cada momento devido a natureza aleatória de como são gerados e transmitidos. Para facilitar a análise destes sistemas, alguns autores fazem simplificações do tipo: assumir que o sucesso da transmissão de um pacote depende somente da captura de seu preâmbulo, ou seja, captura perfeita[17]. Neste esquema admite-se que se o receptor realizar o sincronismo permitindo correlação entre sua seqüência de espalhamento e a do sinal no início da transmissão do pacote esta se dará sem problemas até o seu final, independentemente da quantidade de interferência multi-usuário sofrida durante este intervalo. Outros autores realizam simplificações admitindo que uma transmissão será bem sucedida se o nível de interferência se mantiver abaixo de um determinado limiar, ou seja, a probabilidade de erro de bit será 0 se a interferência estiver abaixo de um limiar estipulado e será 1 caso contrário[18].

O modelo aqui proposto fará a análise de uma rede utilizando *direct sequence spread spectrum*. A modulação utilizada será o BPSK, o protocolo de acesso ao meio será o *unslotted aloha*. Será considerada captura não perfeita. Os pacotes que trafegam na rede possuirão tamanho fixo. Durante a transmissão de cada pacote, o nível de interferência multi-usuário irá flutuar aleatoriamente.

4.5.1 O Modelo

A topologia da rede é indicada na figura 4.3. Um número infinito de usuários independentes transmitem pacotes para um ponto central da rede. Assume-se que a geração dos pacotes obedece a uma distribuição de Poisson com uma taxa de criação λ . No receptor é considerado que todas as transmissões são recebidas com igual potência. Os erros de bits são causados pela interferência de múltiplos usuários e pelo ruído aditivo branco gaussiano.

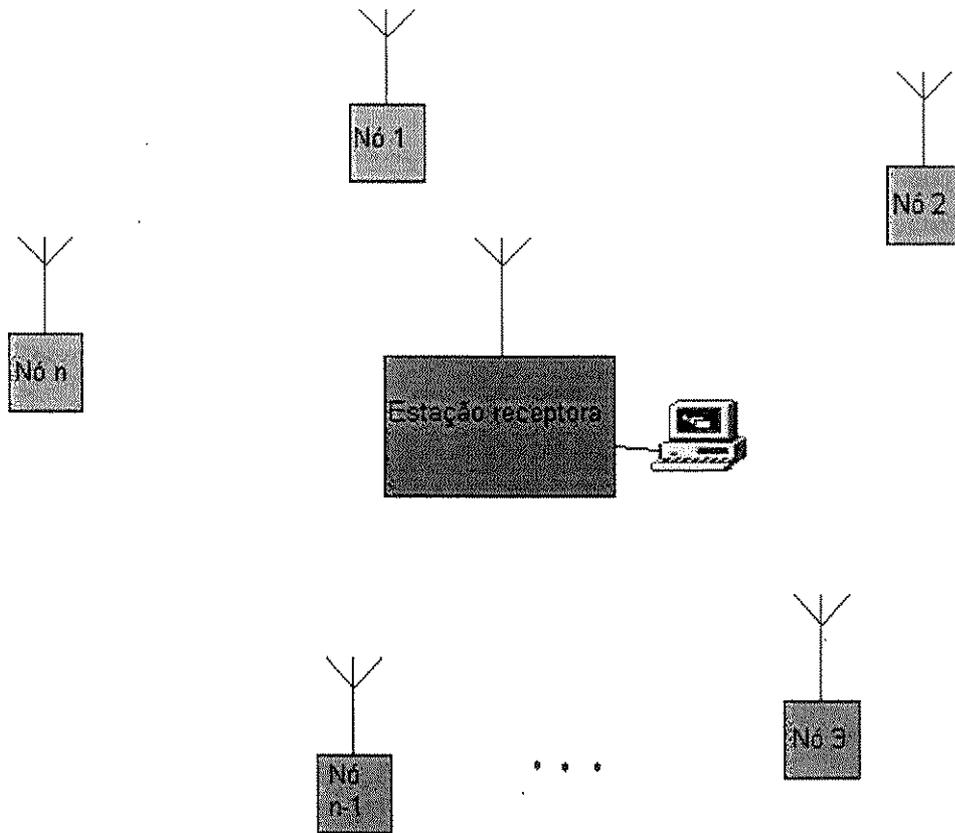


Figura 4.3. Topologia da rede de telemetria.

Em muitos trabalhos a probabilidade de erro de bit de um sinal *direct sequence spread spectrum* frente a interferência de múltiplos usuários e ruído AWGN é dada pela seguinte expressão:

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{3N}{K-1}} \right] \quad \text{onde } Q \text{ é dado por } \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (7)$$

Esta expressão é uma aproximação do valor verdadeiro, o qual é computacionalmente árduo de ser calculado. Nesta expressão a razão sinal/ruído é aproximada através de uma forma gaussiana padrão. Este modelo, apesar de muito utilizado, apresenta pouca precisão em determinadas circunstâncias, principalmente quando o número de usuários interferindo é pequeno. Holtzman [24] apresentou um modelo mais preciso e, no entanto, simples, do

ponto de vista computacional, de ser calculado, o qual será usado neste trabalho. Segundo este modelo a probabilidade de erro de bit em um sistema *direct sequence spread spectrum* usando modulação BPSK com K usuários e sujeito a ruído branco é dado pela seguinte expressão:

$$P_b(K) = \frac{2}{3} Q\left[\left(\frac{K}{3N} + \frac{N_0}{2E_b}\right)^{-0.5}\right] + \frac{1}{6} Q\left[\left(\frac{K(N/3) + \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b}\right)^{-0.5}\right] + \frac{1}{6} Q\left[\left(\frac{K(N/3) - \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b}\right)^{-0.5}\right] \quad (8)$$

$$\text{onde } \sigma^2 = K\left[N^2 \frac{23}{360} + N\left(\frac{1}{20} + \frac{K-1}{36}\right) - \frac{1}{20} - \frac{K-1}{36}\right] \quad (9)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du \quad (10)$$

K é o número de usuários interferindo, N é o número de chips por bit, N_0 é a densidade espectral do ruído gaussiano.

Após realizarmos o modelamento da probabilidade de erro de bit devemos modelar a variação da interferência multi-usuário sofrida por um pacote durante sua transmissão. Para tanto, faremos uso da teoria de filas para compor um modelo estatístico sobre o comportamento dos pacotes que trafegam na rede. Partindo das considerações feitas anteriormente, ou seja, população de usuários infinita, geração de pacotes obedecendo uma distribuição de Poisson com taxa λ e protocolo de acesso ao meio o *unslotted aloha*, podemos pensar nosso sistema como uma fila M/D/ ∞ . A probabilidade de k pacotes serem transmitidos durante o intervalo de tempo T é dado pela distribuição de Poisson

$$P(k,T) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} \quad (11)$$

Definimos P(k) como sendo a probabilidade de k pacotes serem gerados durante o intervalo equivalente ao tamanho do pacote. Assim T é igual a T_p e P(k) é igual a $P(k,T_p)$. Da teoria

de filas temos que a carga ofertada na rede é definida como o número de pacotes transmitidos durante o intervalo de duração do mesmo, T_p . Desta forma:

$$G = \lambda T_p \quad (12)$$

Aplicando (12) na definição de $P(k)$ temos:

$$P(k) = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \quad (13)$$

Realizado o modelamento da geração de pacotes na rede é preciso determinar como ocorre a variação de interferência multi-usuário durante a transmissão de um pacote. Para tal faremos algumas considerações. Como a geração de pacotes obedece a uma distribuição de Poisson, a probabilidade de dois pacotes serem gerados simultaneamente é praticamente desprezível, logo durante um intervalo de tempo pequeno, Δt , a variação do número de pacotes é discreta, ou seja, ou o número permanece constante, ou aumenta de um ou diminui de um. Para efeito de simplificação e economia de tempo de simulação, faremos Δt igual ao período de um bit, o que equivale à criação de mini *slots* de tempo. Se quisermos um resultado mais preciso podemos fazer Δt igual ao período de um *chip*, o que é bastante razoável, no entanto aumenta enormemente o número de iterações durante a simulação.

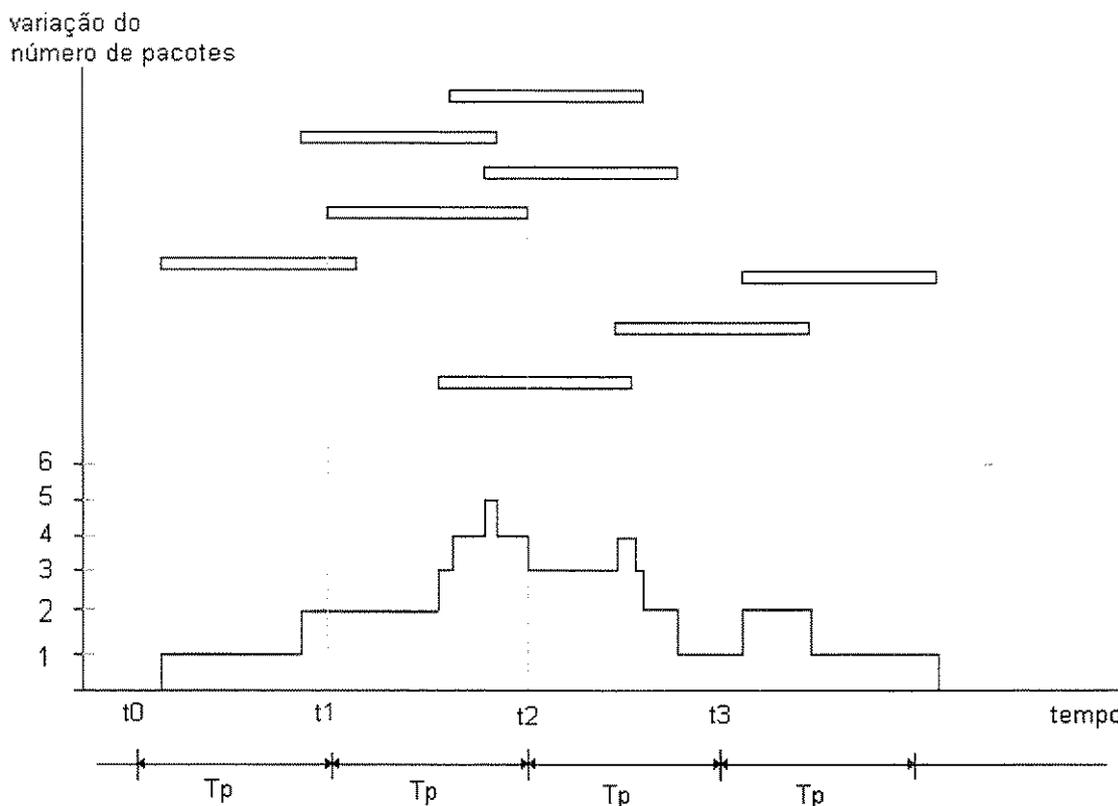


Figura4.4. Variação do nível de interferência durante a transmissão de pacotes.

Iremos representar as variações de interferência de um bit para outro dentro de um pacote através de uma cadeia de Markov. Definiremos o estado k como sendo aquele onde existem k pacotes interferindo com um determinado pacote. As transições de estado estão representadas através da figura 4.5. Uma vez que as transições de estado são baseadas na geração e término de transmissão dos pacotes, precisamos determinar a taxa com que surgem novos pacotes, chamada de taxa de nascimento, e a taxa com que deixam a rede, chamada de taxa de falecimento. Em sistemas onde a taxa com que surgem os pacotes é independente da taxa com que deixam a rede, por exemplo em redes onde o tamanho dos pacotes é variável seguindo uma distribuição exponencial, o que corresponde a um modelo de fila $M/M/\infty$, a determinação das taxas de nascimento e falecimento é imediata. No entanto, em nosso caso, temos que a taxa com que os pacotes deixam a rede é dependente da taxa de geração dos mesmos, logo não teremos uma taxa fixa μ . Suponhamos que k pacotes são originados durante o intervalo $0 < t < T_p$, uma vez que os pacotes possuem

tamanho fixo, durante o intervalo $T_p < t < 2T_p$ k pacotes irão deixar a rede. Como foi assumido que a geração de pacotes obedece a uma distribuição de Poisson e que a chegada de k pacotes em um determinado tempo t corresponde a k pacotes deixando a rede (partindo) no tempo $t + T_p$, logo o processo de partida dos pacotes também será Poisson. Desta forma obteremos a taxa de falecimento como se segue:

k pacotes deixam a rede no intervalo T_p

↓

o tempo médio de partida dos pacotes será T_p/k

↓

logo a taxa de falecimento será

$$\mu(k) = \frac{k}{T_p} \quad (14)$$

A taxa de nascimento para uma distribuição de Poisson é a própria taxa λ que é igual a G/T_p .

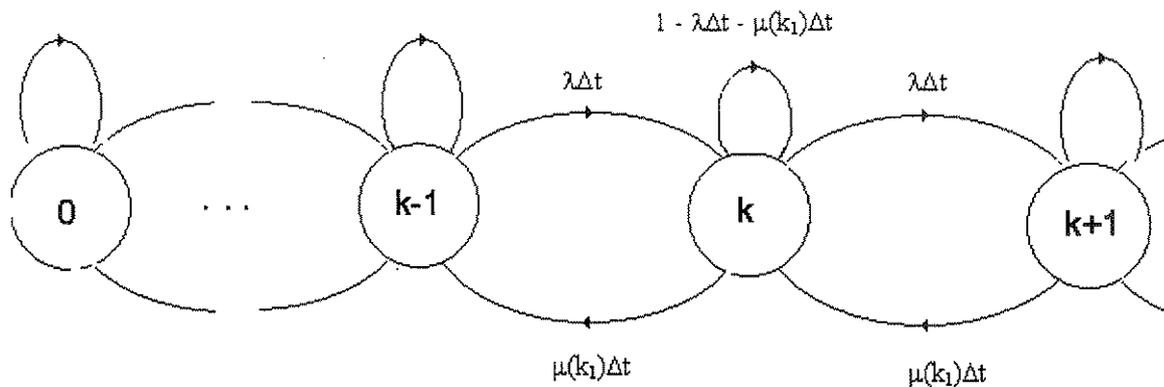


Figura 4.5. Cadeia de Markov representando a variação de interferência sofrida por cada bit.

Faremos agora a análise de vazão da rede. Suponhamos que um determinado pacote seja originado no tempo t_1 e deixará a rede no tempo t_2 . Podemos considerar o número de pacotes interferindo no primeiro bit deste pacote como sendo a quantidade de pacotes gerados no intervalo anterior, t_0 a t_1 . Façamos o número de interferências no primeiro bit ser k_1 . Como k_1 corresponde ao número de pacotes gerados no intervalo T_p , $t_1 - t_0$, k_1 é obtido através de (13). Todos os k_1 pacotes irão deixar a rede no intervalo subsequente, fazendo com que a taxa de falecimento seja $\mu(k_1) = k_1/T_p$.

Como mencionado anteriormente, o nível de interferência poderá permanecer inalterado, aumentar de um ou diminuir de um durante Δt . Logo podemos obter as equações de estado da cadeia de Markov como se segue:

$$P_k(t + \Delta t) = P_k(t) \cdot (1 - \mu(k_1)\Delta t - \lambda\Delta t) + P_{k-1}(t) \cdot \lambda\Delta t + P_{k+1}(t) \cdot \mu(k_1)\Delta t \quad (15)$$

Onde $P_k(t)$ é a probabilidade do sistema se encontrar no estado k no tempo t .

Para calcular a probabilidade de um pacote ser transmitido com sucesso definimos a seguinte função de probabilidade $P_s(k, i, k_1)$ como sendo a probabilidade de haver k_1 pacotes interferindo no primeiro bit de um pacote sendo transmitido. O pacote é transmitido com sucesso até o $i-1$ ésimos bit e o número de interferências se torna k no i ésimo bit. $P_s(k, i, k_1)$ é obtido da seguinte forma:

Caso $i = 1$: o número de pacotes interferindo é k_1 no primeiro bit.

Como k_1 é obtido através de (13), então

$$P_s(k=k_1, i=1, k_1) = \frac{G^{k_1}}{k_1!} \cdot e^{-G} (1 - P_b(k_1)) \quad (16)$$

Caso $i > 1$: o número de pacotes interferindo é k no i ésimo bit.

$$P_s(k, i, k_1) = P_s(k, i-1, k_1) \cdot (1 - \mu(k_1)\Delta t - \lambda\Delta t) \cdot (1 - P_b(k)) + P_s(k+1, i-1, k_1) \cdot \mu(k_1)\Delta t \cdot (1 - P_b(k+1)) + P_s(k-1, i-1, k_1) \cdot \lambda\Delta t \cdot (1 - P_b(k-1)) \quad (17)$$

Para determinar a probabilidade de sucesso de um pacote usando $P_s(k, i, k_1)$ basta fazer $i = L$, onde L é o tamanho do pacote em bits. Para determinar a probabilidade total de sucesso de um pacote precisaremos fazer o cálculo para todas as combinações de k e k_1 de forma que probabilidade de sucesso de um pacote será dado por :

$$Q_s = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{k_1=0}^{\infty} P_s(k, L, k_1) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (18)$$

A vazão do sistema será definida como o número médio de transmissões com sucesso durante o intervalo T_p . Assim a vazão será calculada da seguinte forma:

$$S = G \cdot Q_s \quad (19)$$

4.6 Resultados

O gráfico a seguir nos mostra os resultados das simulações computacionais feitas utilizando o modelo proposto. A vazão S foi normalizada empregando a seguinte relação: $S_{norm} = S/W_r$, onde W_r é a razão entre a banda após o espalhamento e a banda antes do espalhamento espectral.

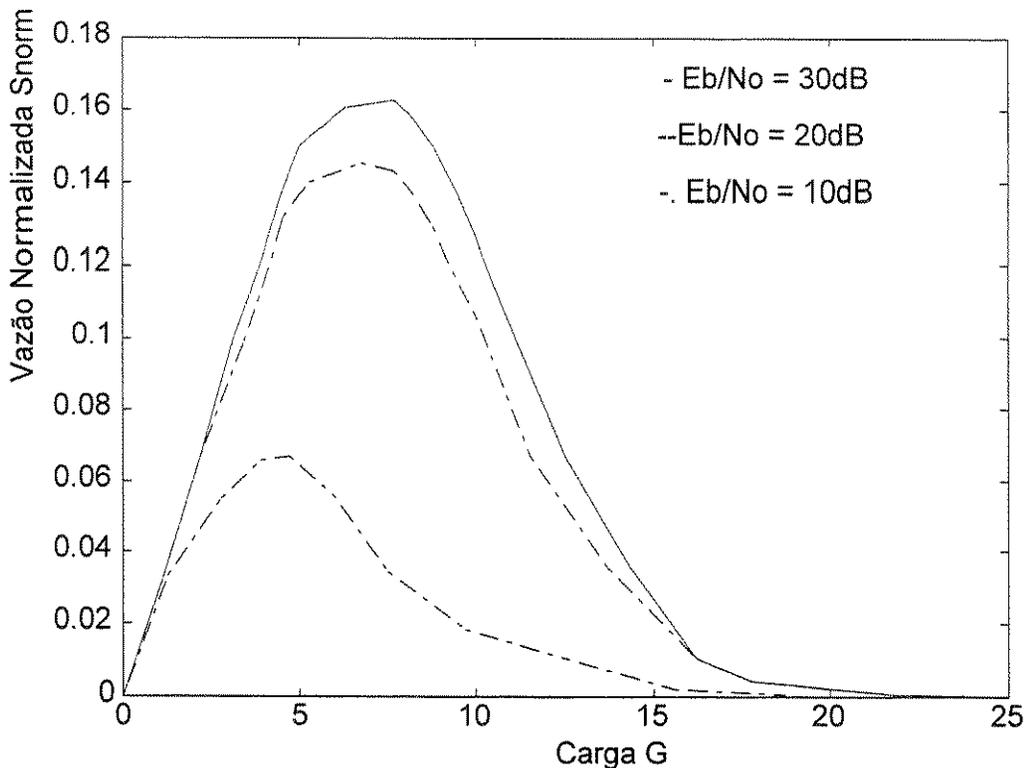


Figura 4.6. Variação da vazão em função da carga ofertada à rede para vários valores de SNR.

Como era esperado a vazão da rede possui um comportamento típico de um esquema de acesso aleatório não sincronizado, ou seja, inicialmente cresce à medida que a carga ofertada aumenta, atinge um ponto máximo, decresce, e para valores muito elevados de G , S tende assintoticamente a zero.

Caso o número de pontos da rede e/ou a quantidade de pacotes gerados sejam muito altos, produzindo uma carga acima do valor correspondente à vazão máxima teremos um desempenho pior da rede. Para cada nó acrescentado à rede a vazão tenderá a diminuir, causando o bloqueio do sistema num caso limite. Uma estratégia para evitar este

fenômeno seria o uso de CLSP (*Channel Load Sensing Protocol*). Neste protocolo o nó, de alguma forma, avalia o nível de interferência multiusuário no canal e somente transmite caso este esteja abaixo de um determinado patamar, ou seja, até β pacotes sendo transmitidos simultaneamente. Este sistema pode ser pensado como uma fila do tipo $M/D/\beta/\beta$. Os pacotes são gerados segundo uma distribuição de Poisson com média λ . O canal possui capacidade para transmitir até β pacotes a cada instante (β -server). Cada novo pacote que entrar na rede e encontrar todos os β servidores ocupados serão rejeitados. A cadeia de Markov que modela este sistema é semelhante à mostrada na figura 4.5., diferindo desta pelo fato de possuir um número finito de estados. Enquanto a primeira possui infinitos estados, a segundo possui β estados.

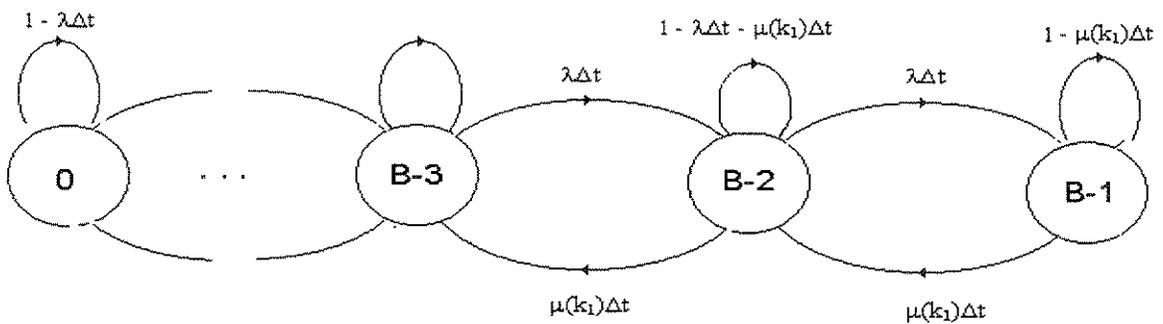


Figura 4.7. Cadeia de Markov utilizada para o modelamento do protocolo CLSP.

Definimos a probabilidade $P_s(k,i,k_1)$ como sendo a probabilidade de haver k_1 pacotes interferindo no primeiro bit de um pacote sendo transmitido. O pacote é transmitido com sucesso até o $i-1$ ésimio bit e o número de interferências se torna k no i ésimo bit.

$P_s(k,i,k_1)$ é obtido da seguinte forma:

Caso $i=1$:

a) $k_1 \leq \beta-1$; o número de pacotes interferindo no primeiro bit é menor ou igual a $\beta-1$. Usando a equação de probabilidade no estado de regime para a fila $M/D/\beta/\beta$, teremos:

$$P_s(k=k_1, i=1, k_1) = \frac{G^{k_1} / k_1!}{\sum_{k_1=0}^{\beta} G^{k_1} / k_1!} (1 - P_b(k_1)) \quad (20)$$

b) $k_1 > \beta-1$; o número de pacotes interferindo no primeiro bit é maior que o limite estipulado pelo protocolo

$$P_s(k=k_1, i=1, k_1 > \beta-1) = 0 \quad (21)$$

Caso $i > 1$:

a) $k < \beta-1$; o número de pacotes interferindo é menor que $\beta-1$. As transições de estado neste caso são iguais ao caso do protocolo Aloha sem CLSP.

$$P_s(k < \beta-1, i, k_1) = P_s(k, i-1, k_1) \cdot (1 - \mu(k_1)\Delta t - \lambda\Delta t) \cdot (1 - P_b(k)) + P_s(k+1, i-1, k_1) \cdot \mu(k_1)\Delta t \cdot (1 - P_b(k+1)) + P_s(k-1, i-1, k_1) \cdot \lambda\Delta t \cdot (1 - P_b(k-1)) \quad (22)$$

b) $k = \beta-1$; o número de pacotes na rede é igual ao limite máximo admitido no protocolo. Neste caso teremos:

$$P_s(k=\beta-1, i, k_1) = P_s(k, i-1, k_1) \cdot (1 - \mu(k_1)\Delta t) \cdot (1 - P_b(k)) + P_s(k-1, i-1, k_1) \cdot \lambda\Delta t \cdot (1 - P_b(k-1)) \quad (23)$$

c) $k > \beta - 1$; o número de pacotes é maior que o limite admitido pelo protocolo.

$$P_s(k > \beta - 1, i, k_1) = 0 \quad (24)$$

A probabilidade de um pacote ser transmitido com sucesso é igual a probabilidade de que nenhum bit seja decodificado de forma errada durante a recepção. Para calcularmos isto é preciso empregar as equações de 20 a 24 em todas as situações de interferência possíveis. Isto é feito no modelo a seguir:

$$Q_s = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{k_1=0}^{\infty} P_s(k, L, k_1) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (25)$$

A vazão do sistema é dado por:

$$S = G_{sis} Q_s \quad (26)$$

onde G_{sis} é a carga média ofertada ao servidor que é igual a taxa na qual os pacotes são transmitidos, dada por:

$$G_{sis} = \frac{\sum_{j=0}^{\beta} j \cdot G^j / j!}{\sum_{j=0}^{\beta} G^j / j!} \quad (27)$$

A seguir temos os resultados para modelo usando CLSP.

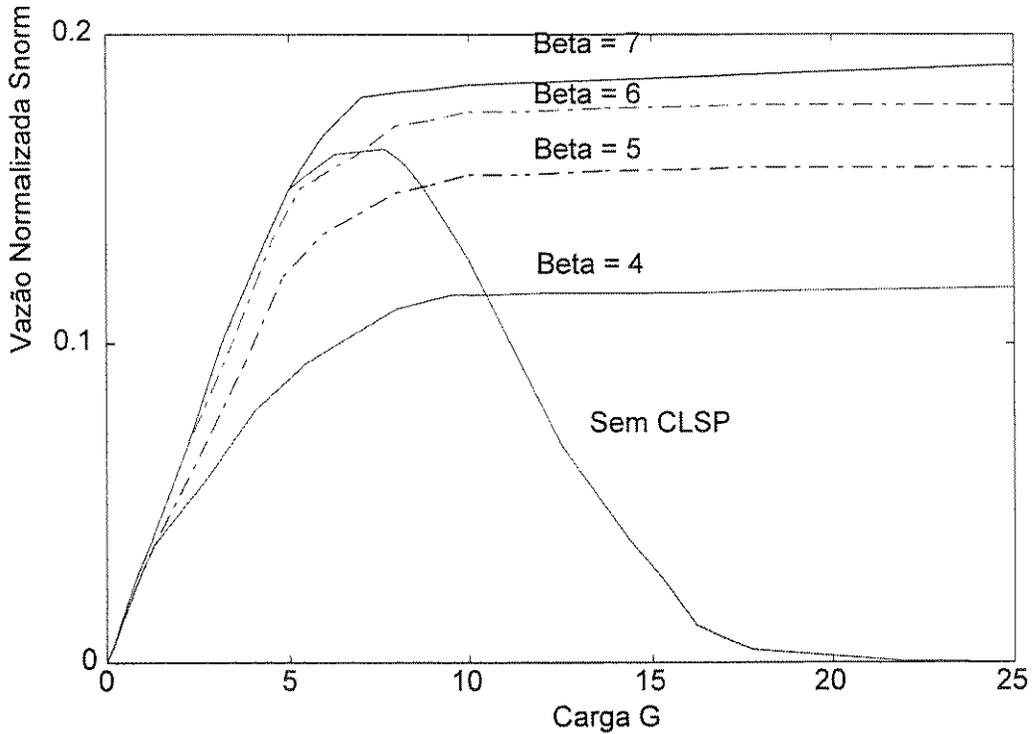


Figura 4.8. Gráfico da vazão x carga utilizando CLSP para vários valores de β .

O gráfico acima nos leva a crer que aumentando β teremos uma maior vazão para a rede e conseqüentemente um melhor desempenho. No entanto, não é isto que acontece. O gráfico seguinte evidencia a existência de um valor ótimo para β como podemos observar:

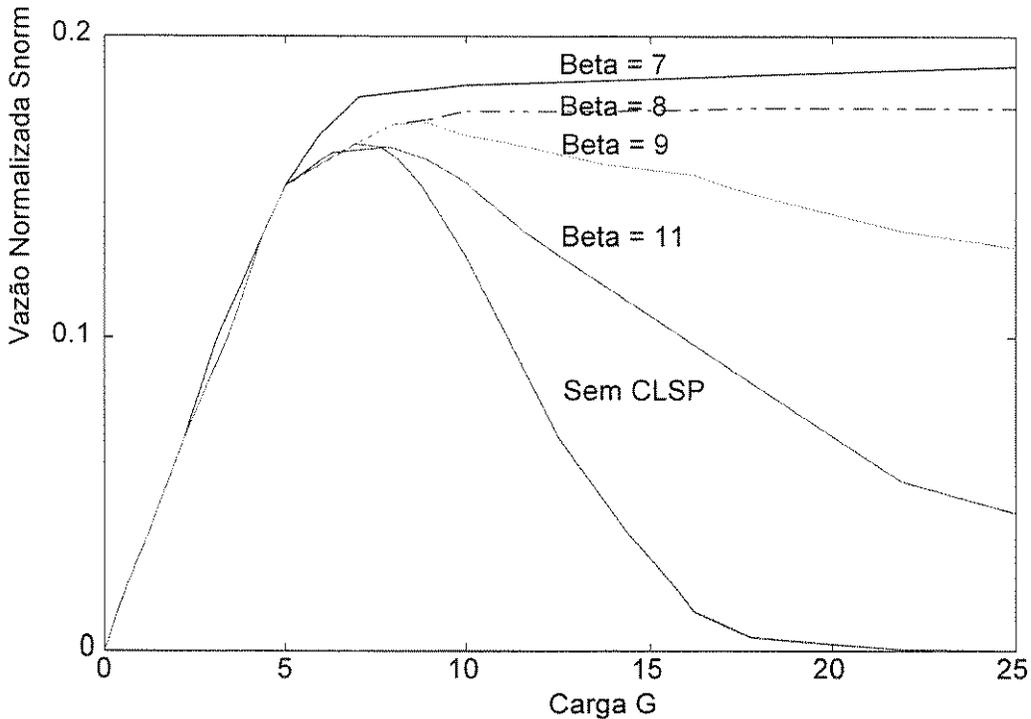


Figura 4.9. Gráfico de vazão x carga utilizando CSLP para vários valores de β .

Podemos observar que o uso do protocolo CSLP pode trazer um aumento de desempenho na vazão do sistema, no entanto é necessária uma correta escolha do valor de β . Se este for muito pequeno, pacotes deixaram de ser transmitidos em determinados momentos, mesmo que o nível de interferência multi-usuário permita a existência de um maior número de transmissões. Por outro lado, se β for elevado, o sistema tolerará o envio de muitos pacotes simultaneamente fazendo com que a relação sinal/interferência caia, provocando um aumento na taxa de erro de bit e consequentemente perdas de pacotes. No limite quando β tende a infinito o desempenho do sistema utilizando CSLP é idêntico ao do sistema sem este protocolo. Na prática para valores de β maiores que 30 isto já é confirmado.

A utilização ou não deste protocolo deverá ser baseada na utilização da rede. Para uma baixa carga ofertada dificilmente quantidade de pacotes simultâneos a serem transmitidos atingirá o limiar β e, por conseguinte, o protocolo proporcionará pouca ou nenhuma melhora no desempenho, sendo mais vantajoso, por sua simplicidade de implementação, o *Aloha*. Se desejarmos trabalhar na região de grande carga ofertada à

rede a melhora no desempenho com relação ao *Aloha* puro justifica a utilização do CLSP, mesmo em face de seu *hardware* mais sofisticado.

Outras estratégias podem ser adotadas afim de se atingir valores maiores de vazão. Podemos citar como exemplo o emprego de códigos corretores de erro, que se forem usados com propriedade podem trazer ganhos de desempenho [16]. Não nos ateremos ao estudo destas estratégias, uma vez que o custo de implementação das mesmas não se justifica na maioria das redes de telemetria.

4.7 Conclusões.

Neste capítulo foram descritos e avaliados vários protocolos de acesso ao meio com relação a utilização destes em redes de telemetria. Concluimos que, para a maioria dos casos, notadamente aqueles onde os dados enviados não são sensíveis ao retardo de transmissão, o protocolo que oferece a melhor relação entre desempenho e complexidade/custo de implementação é o *Aloha*.

Foi apresentado um modelo para análise de vazão de rede utilizando uma aproximação para a probabilidade de erro de bit mais precisa que a normalmente usada na literatura para o caso de transmissão em *spread spectrum* com modulação BPSK. O mesmo modelo foi aplicado para o protocolo *Aloha* com CSLP.

Apartir dos resultados obtidos é possível perceber que a inclusão do protocolo CSLP ao *Aloha* confere a este um melhor desempenho, principalmente quando a carga ofertada à rede é grande. Para pequenos valores de carga não há incrementos consideráveis na vazão da rede. O mesmo acontece quando o parâmetro β escolhido não é apropriado. O correto dimensionamento da rede, ou seja, número de nós, taxa de transmissão, estimativa de carga, conhecimento do canal nos permite determinar se haverá ou não a necessidade do emprego desta estratégia, o CLSP, evitando o uso de equipamentos mais sofisticados desnecessariamente.

Capítulo 5: Uma visão geral da rede

5.1 Uso de células

No capítulo anterior avaliamos diversos métodos de acesso ao meio e fizemos a opção de utilizar o protocolo aloha para este fim. Podemos ver através dos resultados das simulações computacionais dos modelos que no caso de aloha simples existe um valor de carga ofertada à rede que corresponde a uma vazão máxima. Valores além deste provocam um decréscimo no desempenho da rede. No caso de aloha associado a CLSP, para valores de β abaixo de 8, a vazão atinge um ponto máximo para um determinado valor de carga e permanece neste ponto mesmo com o aumento da carga. No entanto, neste protocolo, quando a carga aumenta também aumenta o tempo médio para entrega de um pacote, ou seja, sempre que um nó deseja transmitir um pacote e existirem β pacotes sendo enviados neste momento, o nó deverá abortar a transmissão naquele instante e realizar uma nova tentativa. O número de tentativas aumentará com a elevação da carga ofertada. Desta forma o pacote permanecerá mais tempo na fila de espera de transmissão. Paulatinamente, outros pacotes entrarão nesta fila. Como os nós não possuem memória infinita para armazenamento de pacotes, haverá um determinado momento que, devido à carga elevada, a taxa de atendimento aos pacotes será inferior à taxa de chegada de pacotes ao servidor, no caso o transmissor, ocasionando o preenchimento de toda a memória e conseqüentemente ocorrendo perda daqueles que porventura não possam ser armazenados.

As observações acima nos levam a concluir que a rede deverá operar com valores de carga abaixo de um determinado limite. Isto, na prática, significa limitar o número de nós da rede. Em uma rede metropolitana de telemetria, a grande quantidade de pontos de coleta facilmente faria com que este limite de carga fosse extrapolado. Uma solução para este problema seria a divisão de toda a área de abrangência da rede em regiões menores, cada qual com um número limitado de nós, ou pontos de coleta. Assim, a região de cobertura da rede de telemetria seria dividida em células de acordo com um planejamento baseado, entre outras coisas, na demanda.

A utilização desta estratégia não só atende à questão do número limite de usuários como resolve um outro problema que é a potência de transmissão de cada nó. Com

distâncias menores entre os pontos de coleta e a estação concentradora, uma menor quantidade de potência será necessária nos transmissores, aumentando a vida útil das baterias que porventura sejam utilizadas nos pontos de coleta de dados, diminuindo a poluição do espectro e praticamente eliminando a necessidade do uso de estações repetidoras.

A adoção da estratégia de dividir a área de cobertura da rede em células implica no uso de mecanismos de utilização/reutilização dos canais afim de se minimizar as interferências de usuário de células adjacentes. Em redes de telemetria onde, via de regra, os pontos de coleta de dados são fixos, o problema de interferência entre células pode ser drasticamente reduzido se forem utilizadas antenas direcionais no canal reverso (RTU para estação concentradora). Esta estratégia ainda contribui para o emprego de potências de transmissão ainda menores. Esquemas de reutilização de canais como o padrão de sete cores adotado no sistema AMPS aliado ao emprego de antenas direcionais podem atuar conjuntamente de forma a compor uma solução interessante para a questão da interferência entre células.

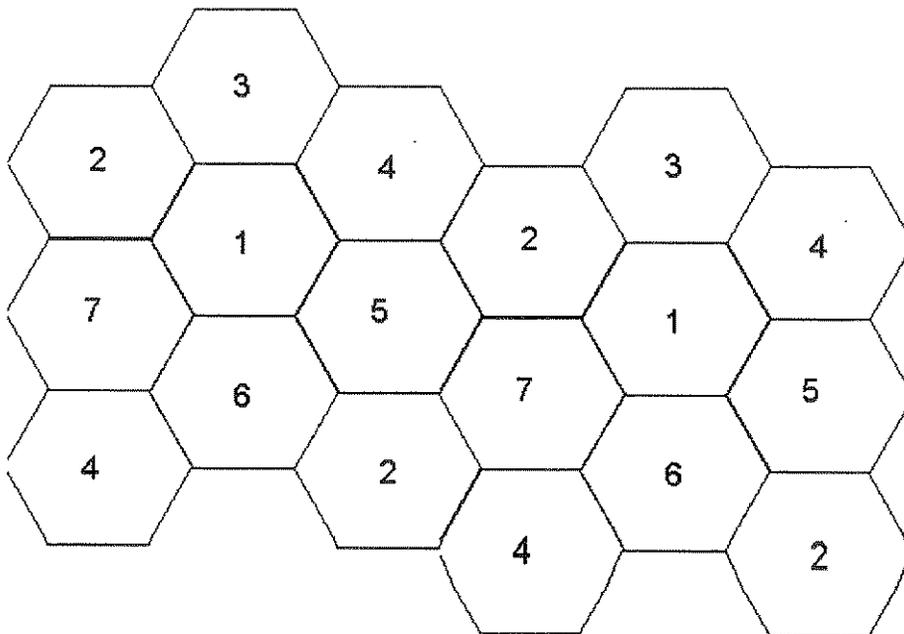


Fig. 5.1. Padrão de 7 cores de reutilização de canais.

5.2 Transferência de dados entre células

A quantidade de informação gerada por célula é o resultado do conjunto de informação oriunda de cada ponto de coleta desta célula. Os pacotes recebidos pelo concentrador de cada célula podem ser ordenados segundo uma determinada política e enviados ao nó da rede responsável pelo armazenamento de todas as informações da rede, o banco de dados central, de forma periódica. Desta forma o tráfego gerado por cada célula apresenta características bastante diferentes com relação ao produzido internamente. Assim, o primeiro se caracteriza por grande quantidade de dados (taxa elevada de transmissão) e de natureza periódica, enquanto que no segundo caso, assumimos possuir baixa velocidade e comportamento não periódico. Logo, os protocolos de acesso ao meio distribuídos que se adequam bem ao tráfego produzido pelos pontos de coleta de dados não satisfazem as necessidades exigidas pelo tráfego de dados entre células e o nó central. Neste caso os protocolos centralizados, tais como FDMA, TDMA, CDMA e *Polling*, se adaptam melhor às características deste tráfego.

5.3 O meio de transmissão inter-células.

Em capítulo anterior discutimos sobre o uso de transmissão com e sem fio para a transferência de dados entre os pontos de coleta de dados (RTUs), e o ponto concentrador. Vimos que neste caso o uso do rádio enlace oferece grandes vantagens com relação ao emprego de fios como meio de transmissão, como por exemplo:

- maior flexibilidade e agilidade na instalação de pontos de coleta de dados;
- custo menor de manutenção quando comparado ao uso de LPs e outros meios físicos,
- melhor aproveitamento da banda disponível.

Estas características são bastante desejáveis para a comunicação entre os RTUs e a estação concentradora em virtude da grande quantidade existente deste último.

Para a comunicação entre células as características desejáveis são diferentes. Como os pontos concentradores são geralmente estáticos dentro da célula, ou seja, dificilmente sua localização geográfica será alterada, não haverá necessidade de um esquema tão flexível e ágil. As altas taxas de dados implicam em bandas maiores para a transmissão. Logo o uso de fios para transferência de dados torna-se viável para esta aplicação, tanto do ponto de vista funcional, por suportar altas taxas de dados, como do ponto de vista econômico, uma vez que o número de enlaces não é tão grande comparando-se ao existente no interior da célula. Aliado a isto temos que o custo de um rádio enlace para grandes velocidades de transmissão é muito maior do que o custo dos transceptores utilizados no interior de cada célula, o que torna mais atrativo o uso de soluções baseadas em meios físicos de transferência de dados, mesmo tendo em vista os aportes financeiros referentes a gastos de manutenção.

Por outro lado, o uso de rádio enlace para a comunicação entre células obriga a existência de canais específicos para este fim, o que implica na diminuição de banda disponível para a troca de dados no interior das células e conseqüentemente reduz o número de pontos de coleta.

Visto isto, concluímos que uma boa estratégia a ser considerada para a implementação dos enlaces entre células é a utilização de esquemas baseados em meios confinados (fios, cabos, fibra óptica) para a transferência de dados, podendo, inclusive, serem usados os suportes já existentes para outros tipos de redes como por exemplo a rede de comutação telefônica, sistemas de TV por assinatura, *internet* e outros.

5.4 Conclusões finais

Neste trabalho avaliamos as características de um sistema genérico de telemetria para aplicações em áreas metropolitanas. Estudamos aspectos relativos ao tráfego de dados gerado e seus requisitos. Baseado nestes aspectos e em outros de natureza funcional tais como flexibilidade, custo, facilidade de implementação, concluímos que a utilização de rádio enlace, mais especificamente o uso da técnica de espalhamento espectral, é capaz de conferir ao sistema as características desejáveis, tais como: facilidade

de crescimento da rede, menor custo, baixo nível de interferência em outros sistemas, confiabilidade e outros. Em nível da camada de enlace, analisamos diversos protocolos de acesso ao meio e apontamos como sendo o mais interessante do ponto de vista da relação complexidade/desempenho o protocolo *aloha*. Desenvolvemos um modelo para análise de vazão deste MAC considerando variação aleatória de interferência durante transmissões de pacotes. Adicionamos o protocolo CLSP e verificamos as situações onde há ganho de desempenho. Os resultados das simulações dos modelos comprovam a factibilidade destes protocolos para esta aplicação.

No intuito de aumentar o número de pontos de coleta, propomos a divisão da rede em células. Devido às características do tráfego gerado pelas células, consideramos como uma solução viável para a troca de dados entre as mesmas o uso de um protocolo centralizado bem como a utilização de uma rede a fio como meio de transferência, podendo, inclusive, ser usado redes de dados já existentes.

Resultados obtidos oriundos da implementação de uma pequena célula de uma rede protótipo com fins de coleta de dados de hidrômetros baseada nos moldes aqui propostos nos levam a acreditar na viabilidade técnica e comercial deste tipo de rede.

6 Referências Bibliográficas

- [1] Scholtz, Robert A. , “The Origins of Spread Spectrum Communications”, IEEE Trans. Commun., vol COM-30, pp 822-854, May 1982.
- [2] Proakis, John G. , “Digital Communications”, McGraw Hill, 3^aed. 1995.
- [3] Dixon, Robert C. , “Spread Spectrum Systems”, Wiley and Sons 3^aed. 199_.
- [4] Flikkema, Paul G. , “Spread Spectrum Techniques for Wireless Communications”, IEEE Signal Processing Magazine, vol __, pp 26-36, May 1997.
- [5] Shannon, Claude E.; Weaver, Warren, “Mathematical Theory of Communication”, Univ. Illinois Pr., 1963.
- [6] Simon,Marvin K.;Omura, Jim K., “Spread Spectrum Handbook”, McGraw Hill, 2^o ed., 1994.
- [7] Gil, Amit, “Quantum Leaps for Frequency Hopping”, Telecommunications Mag. Vol 31, N^o 10,pp 105-106, October 97.
- [8] Strategic microelectronics homepage “www.strategmic.com”
- [9] Pahlavan, Kaven and Levesque, Allen H., “Wireless Information Networks”, Wisley and Sons, March 1995.
- [10] Gruenberg, Elliot L., “Handbook of Telemetry and Remote Control”, McGraw Hill,1997.
- [11]Carden, Frank, “Telemetry SystemsDesign”, Artech House, 1995.
- [12]Wesel, Ellen Kayata, “Wireless Multimedia Communications, Networking Video, Voice and Data”, Adison Wesley, 1998.
- [13]Kyoso, Masaki, Takane, Toshiaki e Uchiyama,Akihiko, “Performance of Spread Spectrum Medical Telemetry System in a Shared Frequency Band with Current Telemetry System”, IECE Tran. Commun., vol E78-B N^o 6, pp 862-865, June 1995.
- [14]Calvert Technologies homepage “www.calvert.com”
- [15]R., Fantacci, “Performance Evaluation of Preemptive Polling Schemes and ARQ Techniques for Indoor Wireless Communications”, IEEE Trans. On Vehicular Technology, vol 45, N^o 2, may 1996.
- [16]Kuriacose, Joseph e Raychaudhuri, D., “Througput of Unslotted Direct_Sequence Spread Spectrum Multiple Access Channels with Block FEC Coding”, IEEE Trans. On Commun., vol 41, N^o 9, pp 1373-1378, September 1993.
- [17]Abdelmonem, Ahmed H. e Saadawi, Tarek N., “Performance Analysis of Spread Spectrum Packet Radio Network with Channel Load Sensing”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 7, N^o 1, pp 161-166, January 1989.
- [18]Yin, Ming e Li, Victor O. K., “Unslotted CDMA Fixed Packet Lengths”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 8, N^o 4, pp 529-541, May 1990.
- [19]Storey, James S. e Tobagi, Fouad A., “Througput Performance of na unslotted Direct-Sequence SSMA Packet Radio Network”, IEEE Trans. Commun., vol 37, N^o 8, pp 814-823, August 1989.
- [20]Gluck, Jeffrey W. e Geraniotis, Evangelos, “Througput and Packet Error Probability of Cellular Frequency-Hopped Spread Spectrum Radio Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 7, N^o 1, pp 148-160, January 1989.

- [21]Morrow, Robert K. e Lehnert, James S., "Packet Througput in Slotted ALOHA DS/SSMA Radio Systems with Random Signature Sequence", IEEE Trans. Commun. Vol 40, N° 7, pp 1223-1230, July 1992.
- [22]Cheun, Kyungwhoon, "Optimum Arrival Time Distribution for Delay Capture in Spread Spectrum Packet Radio Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 46, N° 4, pp 981-991, November 1997.
- [23]Zhang, Ker e Pahlavan, Kaveh, "Relation Between Transmission and Througput of Slotted ALOHA Local Packet Radio Networks", IEEE Trans. Commun. vol. 40, N° 3, pp 577-583, March 1992.
- [24]Holtzman, Jack M., "A Simple, Accurate Method to Calculate Spread Spectrum Multiple Access Error Probabilites", IEEE Trans. Commun. vol. 40, N° 3, pp 461-464, March 1992.