

# Explorando a Capacidade de Sistemas CDMA em Canais Unipolares

José Santo G. Panaro\* e Celso de Almeida\*\*

\*DEE – Inatel

\*\* DECOM – FEEC – UNICAMP

**Sumário** – Sob certas condições, alguns canais de comunicação, como as fibras ópticas, podem ser modelados como sendo unipolares. Este trabalho apresenta alguns resultados decorrentes de investigação teórica sobre a capacidade de sistemas CDMA nesses canais, considerando-se a utilização de sinalizações podal e ortogonal. Para cada um dos casos, a capacidade do sistema é obtida a partir da consideração dos efeitos da interferência aditiva e estritamente positiva, determinados anteriormente para os códigos OTH aleatórios. Os resultados são comparados em relação ao de um sistema CDMA bipolar equivalente, com decisão abrupta no receptor. Finalmente, aventando-se a hipótese do transmissor obter a realimentação dos eventos de erro no canal unipolar através de um acoplador em estrela bidirecional, são propostas estratégias de codificação para ambos os tipos de sinalização, e os resultados analisados.

**Palavras Chave** – Teoria da Informação, Canal OU, Canal Z, Canal com Apagamento, CDMA Óptico, Códigos OOC, Códigos OTH.

## I. INTRODUÇÃO

Alguns tipos de canais de comunicação admitem somente sinalização unipolar, isto é, a amplitude dos sinais que trafegam pelo mesmo é estritamente positiva. O exemplo mais patente de um canal unipolar são os meios de transmissão ópticos e, em particular, a fibra óptica. Por isso, os sistemas CDMA fotônicos requerem o uso de seqüências de assinatura dos usuários específicas, como as propostas em [1]- [5].

Dependendo do tipo de código de linha empregado e dos parâmetros de operação, o desempenho bruto dos sistemas (sem codificação de canal), medido pela probabilidade de erro, é conhecido pelo menos aproximadamente. No entanto, as seguintes questões surgem naturalmente: a) Quão distante o desempenho desses esquemas estão do limite teórico da capacidade do canal? e b) Existem alternativas para melhorar o desempenho global desses sistemas? O propósito do presente trabalho consiste em fornecer algumas respostas a essas questões.

## II. O CANAL “OU”

O canal OU (*wired-OR*) é bastante utilizado em sistemas de computadores e de lógica digital, porém, ainda pouco explorado em sistemas de comunicações. Conforme mostrado na Fig. 1, pode-se representá-lo

através de uma linha de transmissão ideal, comum a todos os usuários, terminada adequadamente, de forma a apresentar um potencial nulo quando a mesma encontra-se desocupada. Cada usuário dispõe de um elemento comutador (chave) que encontra-se normalmente aberto. Quando o mesmo deseja transmitir uma informação, o mesmo pode fechar a chave de forma a introduzir um nível 1 na linha ou, então, mantê-la aberta na tentativa de sinalizar um nível 0 no meio de transmissão. Assim, em decorrência, sempre haverá sucesso na transmissão de um bit 1, enquanto que o resultado da transmissão de um bit 0 é incerto: - se, pelo menos, um usuário concorrente ativar o canal durante o intervalo de bit, simultaneamente, ocorrerá um erro para o usuário de referência. Obviamente, para uma comunicação efetiva, não se deve permitir que os usuários ocupem o meio de transmissão durante todo o intervalo de bit, daí a necessidade de se recorrer a códigos de linha apropriados, que ocupem o canal apenas uma fração do período de bit, configurando, assim, um sistema CDMA através de seqüências de espalhamento temporal. Tipicamente, o intervalo de bit é dividido em  $N$  chips, sendo que as seqüências dos usuários alocam  $K$  chips na transmissão de cada bit. Para os códigos OTH a alocação é dinâmica [1]-[2], enquanto que para o OOC a mesma é fixa [3]-[5].

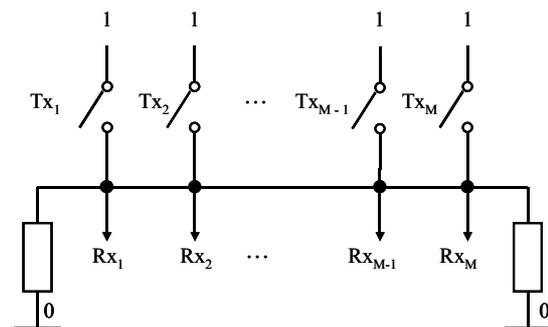


Figura 1. Representação esquemática do canal OU.

Sob a perspectiva do tipo de sinalização a ser empregado, existem duas possibilidades básicas: a utilização de sinalização podal ou ortogonal. A sinalização podal consiste na ativação de todos os  $K$  chips reservados da palavra em curso, caso o bit transmitido seja igual a 1, enquanto que a palavra toda nula é enviada se o bit é 0. No caso ortogonal são usadas duas seqüências distintas de  $K$  chips, de modo

que não haja coincidência entre os mesmos, e ativa uma das seqüências para sinalizar um bit 1, e a outra caso contrário. Como consequência, cada sistema de sinalização origina, do ponto de vista dos usuários, um tipo de canal de comunicação distinto. O sistema podal resulta em sucesso incondicional na transmissão dos bits 1, porém, incerto no caso dos bits 0; entretanto, do ponto de vista do receptor, não existe dúvida que o bit recebido é igual a 0, se pelo menos um chip for recebido em estado baixo, enquanto que há uma certa dose de incerteza caso todos os chips sejam recebidos em nível alto. Para a sinalização ortogonal, há a possibilidade de interferência em ambos os casos. No entanto, se o receptor encontra pelo menos um chip nulo em um dos braços do detetor, o mesmo é capaz de decodificar o bit enviado sem sombra de dúvida. Além disso, caso todos os chips de ambas as seqüências forem detectados em nível alto, o receptor não é capaz de efetuar a decisão, porém, adquire a informação indubitável que ocorreu interferência no canal. Assim, conclui-se que sob a ótica de cada usuário, o canal OU se configura no denominado canal Z, para o caso de sinalização podal, enquanto que a sinalização ortogonal o conforma em um canal com apagamento (erasure channel) ou canal Σ. A seguir são discutidas as características de cada um desses canais.

A. O Canal Z

A Fig. 2 ilustra o comportamento entre a entrada e a saída do canal Z, onde o símbolo de entrada X é uma variável aleatória binária assumindo os valores  $x_0=0$  e  $x_1=1$  com probabilidades  $p_0$  e  $p_1=1-p_0$ , respectivamente. O símbolo de saída Y é, também, uma variável aleatória que pode assumir os valores  $y_0=0$  e  $y_1=1$ , cujas probabilidades a priori são dadas por

$$P(Y=0 | X=1) = 0, \quad P(Y=0 | X=0) = 1 - \alpha; \quad (1a)$$

$$P(Y=1 | X=0) = \alpha, \quad P(Y=1 | X=1) = 1 \quad (1b)$$

A redução da entropia da fonte a partir do conhecimento da saída do canal, isto é, a informação mútua no canal Z é dada por

$$\begin{aligned} I_z(X;Y) &= H(Y) - H(Y|X) \\ &= H_2(p_0(1-\alpha)) - [p_0 H_2(\alpha) + p_1 H_2(0)] \quad (2) \\ &= H_2(p_0(1-\alpha)) - p_0 H_2(\alpha), \end{aligned}$$

onde  $H(Y)$  é a entropia da saída,  $H(Y|X)$  a entropia da saída condicionada ao conhecimento da entrada e, ainda, define-se

$$H_2(q) = -[q \log_2 q + (1 - q) \log_2 (1 - q)] \quad (3)$$

A capacidade do canal Z pode ser obtida determinando-se o máximo valor da informação mútua

tomada sobre todas as possíveis distribuições de entrada  $p(x)$ , isto é,

$$C_z = \max_{p(x)} I(X;Y) \quad (4)$$

Derivando-se a equação (2) em relação à  $p_0$  e igualando o resultado a zero, obtém-se que a distribuição ótima de entrada é uma função de  $\alpha$ , dada por

$$p_0^*(\alpha) = \frac{1/(1-\alpha)}{1 + 2^{(H_2(\alpha)/(1-\alpha))}} \quad (5)$$

Para todos os valores de  $\alpha$ , resulta que  $p_0^*$  é um valor menor ou igual a 1/2. De fato, tem-se que  $p_0^*(0)=1/2$ ,  $p_0^*(1/2)=2/5$  e  $p_0^*(1)=1/e$ . Uma razão intuitiva porque, em geral, o canal deve utilizar mais a entrada 1, em detrimento do entrada 0, é que quando a primeira é usada, o ruído do canal não injeta entropia na seqüência de saída e, portanto, diminuindo  $H(Y|X)$  linearmente com a redução de  $p_0$ , enquanto que  $H(Y)$  não é afetada tão fortemente.

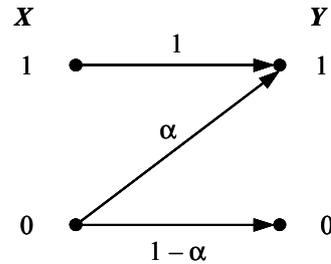


Figura 2. Canal Z.

B. O Canal Σ

O canal com apagamento, representado na Fig. 3, admite três valores para a variável aleatória de saída:  $y_0=0$ ,  $y_1=1$  e  $y_2=?$ , cujas probabilidades de ocorrência, condicionadas ao símbolo de entrada, são dadas por

$$P(Y=0|X=0) = 1-\beta, \quad P(Y=0|X=1) = 0; \quad (6a)$$

$$P(Y=1|X=0) = 0, \quad P(Y=1|X=1) = 1-\beta; \quad (6b)$$

$$P(Y=?|X=0) = \beta, \quad P(Y=?|X=1) = \beta. \quad (6c)$$

Resultando que a informação mútua no canal Σ é dada por

$$\begin{aligned} I_e(X;Y) &= H(Y) - H(Y|X) \\ &= H_2(\beta) + (1-\beta)H_2(p_1) - H_2(\beta) \quad (7) \\ &= (1-\beta)H_2(p_1) \end{aligned}$$

Logo, a capacidade do canal com apagamento é máximo quando  $p_1^*=p_0^*=1/2$ , conduzindo ao resultado bem conhecido que

$$C_e = 1 - \beta. \tag{8}$$

Assim, como uma proporção de  $\beta$  bits de entrada são perdidos no canal, o resultado anterior confirma a intuição de que é possível recuperar a informação confiavelmente, desde que a utilização efetiva desse canal não ultrapasse a taxa de  $1-\beta$  bits por símbolo transmitido.

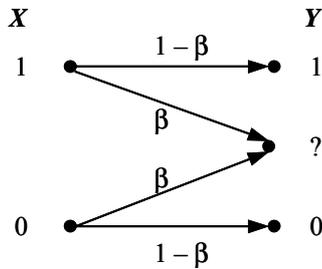


Figura 3. Canal com apagamento.

A Fig. 4 mostra as curvas de capacidade máxima dos canais  $Z$  e  $\Sigma$ , comparada à capacidade do canal binário simétrico (BSC), a qual pode ser calculada por:

$$C_b = 1 - H_2(\epsilon) \tag{9}$$

onde  $\epsilon$  é a probabilidade de transição do BSC. Conforme pode-se observar, os canais  $\Sigma$  e  $Z$  fornecem, nesta ordem, uma capacidade superior ao BSC para probabilidades de transição de erro no canal idênticas. Esse fato ocorre em maior amplitude para  $\alpha=\beta=\epsilon=1/2$ , quando obtém-se que  $C_e=0,5$ ,  $C_z=0,32$  e  $C_b=0$ . No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois,  $\epsilon=1/2$  ocorre para uma relação sinal-ruído nula no BSC, enquanto que o mesmo não acontece nos outros canais. Por essa razão, a Figura 5 mostra o gráfico de  $C_b \times 2\epsilon$ , de modo a fazer coincidir os pontos de capacidade nula de todos os gráficos, permitindo, assim, uma comparação do desempenho dos canais de interesse mais justa.

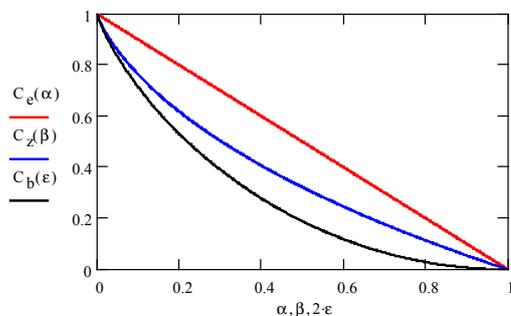


Figura 4. Comparação entre as capacidades dos canais  $\Sigma$ ,  $Z$  e BSC.

### III. CAPACIDADE DOS SISTEMAS CDMA COM SINALIZAÇÃO UNIPOLAR

O ambiente de múltiplo acesso através de divisão por código, em um canal unipolar confinado, pode ser modelado por meio de uma rede em que todos os usuários estão conectados através de um *acoplador em estrela*. Admitindo que o acoplamento seja bidirecional, cada usuário pode, então, transmitir e receber dados através da sua derivação, conforme ilustrado na Fig. 5.

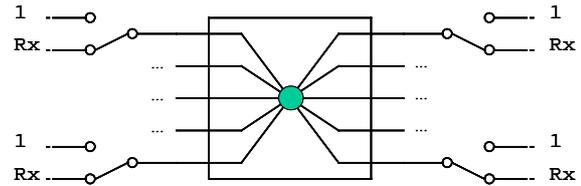


Figura 5. Rede CDMA unipolar com acoplador em estrela bidirecional.

#### A. Sistemas CDMA com Sinalização Podal

Assume-se que a menor unidade de tempo que o canal pode ser utilizado corresponde a um chip, tal que em um intervalo de bit existam  $N$  chips. Além disso, os  $M$  usuários são independentes e, para simplicidade de implementação do receptor, os mesmos desconhecem as seqüências dos demais. Como parte da estratégia de comunicação, o transmissor utilizará um código aleatório, ocupando em média,  $K$  chips para efetuar a transmissão de um bit. Logo,, a probabilidade de um usuário ativar um determinado chip no decorrer de um intervalo de bit será dada por

$$p = p_1 \frac{K}{N}. \tag{10}$$

Portanto, a probabilidade de que uma fatia composta por  $K$  chips, oertencente a um determinado usuário, seja completamente ativada no intervalo de um bit pode ser expressa por

$$P_K = [1 - (1 - p)^{M-1}]^K. \tag{11}$$

Conforme o resultado obtido em [1], a equação anterior apresenta um ponto de mínimo, e o valor de  $K_o$  para o qual o mesmo ocorre pode ser calculado aproximadamente, para  $M \gg 1$ , através de

$$K_o \cong \frac{N \ln 2}{p_1 M}, \tag{12}$$

acarretando, ainda, que a probabilidade de um chip não ser ativado, nessas condições, converge para 1/2, isto é,

$$\lim_{M \rightarrow \infty} (1 - p)^M = \frac{1}{2}. \quad (13)$$

Logo, substituindo-se os resultados (12) e (13) na Eq. (11), obtém-se que a probabilidade média de um usuário ter um bit igual a 0 totalmente interferido, ao fazer uso de uma fatia do canal é dada por

$$\alpha = P_{K_0} \cong \exp\left[-\frac{N}{(1 - p_0)M} (\ln 2)^2\right]. \quad (14)$$

Como se admite que os usuários desconhecem as seqüências dos demais, cada um dos receptores estará submetido às condições de um canal Z, com probabilidade de transição de acordo com a Eq. (14). Assim, o limite da taxa de transmissão conjunta desse sistema CDMA, considerando que todos usuários transmitem na mesma taxa, pode ser expressa por

$$R_p(M) \leq MC_z(\alpha). \quad (15)$$

Em conseqüência, obtém-se que a capacidade desse sistema CDMA com sinalização podal é máxima para  $1/2 \leq p_0^* < 1$ , acarretando que

$$C_p = R_p^*(\infty) \leq N \ln 2, \quad (16)$$

para  $p_0 \rightarrow 1$ . Assim, esse sistema tem o potencial de atingir, aproximadamente, até 69% da capacidade de um sistema TDMA ideal, porém é necessário que se use códigos de fonte extremamente esparsos. Comparativamente, fixando-se a distribuição de probabilidade da fonte em  $p_0 = p_1 = 1/2$ , obtém-se que

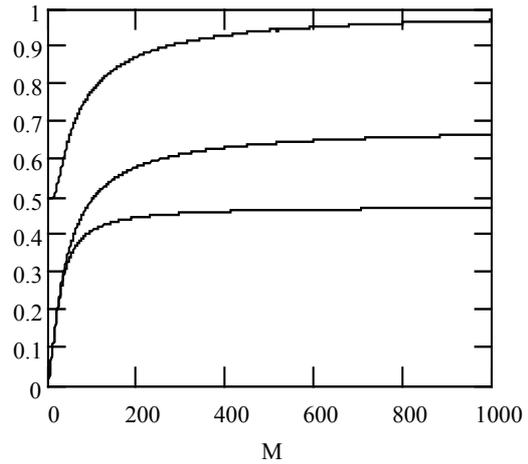
$$R_p(\infty) \cong N (\ln 2)^2, \quad p_0 = 1/2. \quad (17)$$

A Fig. 6 ilustra o limite da taxa de transmissão conjunta, em função do número de usuários que compartilham o canal, para  $p_0 = 1/2$  e para a distribuição de fonte ótima. Para o último caso, também, está mostrada a evolução de  $p_0^*$ .

### B. Sistemas CDMA com Sinalização Ortogonal

A outra possibilidade a ser investigada, é a capacidade dos sistemas com sinalização unipolar ortogonal. Nesse caso, os usuários ativarão, em média,  $K$  chips a cada bit transmitido, selecionados da seqüência correspondente ao estado do bit. Assim, a probabilidade de interferência nos  $K$  chips da seqüência mantida inativa, será expressa por

$$P_K = \left[1 - (1 - K/N)^{M-1}\right]^K. \quad (18)$$



**Figura 6.** Taxa de transmissão normalizada para um sistema CDMA unipolar com sinalização podal ( $N = 100$ ) para

Então, tem-se que o número de chips ativos, para o qual a probabilidade expressa em (18) é minimizada, é dado por

$$K_o \cong \frac{N \ln 2}{M}, \quad (19)$$

Implicando, assim, que a probabilidade de transição, no canal  $\Sigma$  correspondente, pode ser obtida por

$$\beta = P_{K_o} \cong \exp\left[-\frac{N}{M} (\ln 2)^2\right]. \quad (20)$$

Assim, a taxa de transmissão conjunta desse sistema CDMA fica limitada a

$$R_O(M) \leq MC_e(\beta), \quad (21)$$

E, em conseqüência, o valor da capacidade global do sistema converge para

$$C_O = R_O(\infty) \leq N (\ln 2)^2, \quad (22)$$

Ou seja, atingindo até 48% da capacidade de um sistema TDMA ideal, independentemente da distribuição de probabilidade da fonte.

### C. Sistemas CDMA com Sinalização Bipolar e Decisão Abrupta em Canais Simétricos

Um canal analógico unipolar pode ser modelado como um canal OU, conforme representado na Figura 1, desde que se utilize uma técnica de *limitação abrupta* na recepção [4], de forma a se obter apenas amplitudes de entrada zero ou um. Esse processo equivale a uma decisão abrupta do estado de cada chip da seqüência do usuário. De modo similar, um canal BSC tem origem quando se realiza uma decisão abrupta, a cada intervalo do bit, sobre o sinal recebido em um canal analógico bipolar.

Assim, para um sistema CDMA com sinalização bipolar, interferência gaussiana e decisão abrupta no receptor, o canal percebido por cada usuário pode ser modelado como BSC, cujas probabilidades de transição são dadas por

$$\varepsilon = Q\left(\sqrt{\frac{N}{M-1}}\right), \quad (23)$$

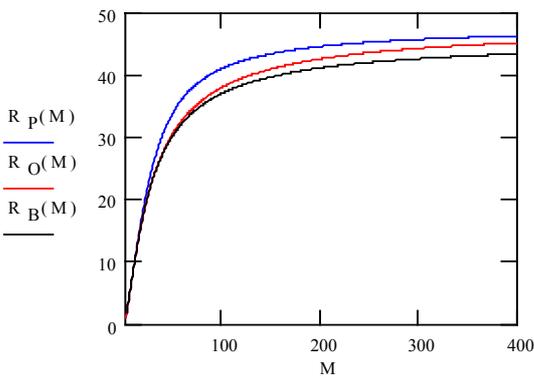
onde  $Q(x)$  é a função área de cauda de gaussiana, e  $N$  é o ganho de processamento do sistema. Logo, nesse caso, a taxa conjunta dos  $M$  usuários fica limitada a

$$R_B(M) \leq MC_b(\varepsilon), \quad (24)$$

resultando, então, que a capacidade desse sistema, com as restrições impostas, pode ser expressa por

$$C_B = R_B(\infty) \leq \frac{N}{\pi \ln 2}. \quad (25)$$

A Fig. 7 mostra os gráficos comparativos da evolução da taxa de transmissão máxima para todos esses sistemas CDMA, para probabilidades de fonte iguais a  $1/2$ . Nota-se que a capacidade do canal unipolar, para ambos os tipos de sinalização, é superior ao canal bipolar, desde que o receptor empregue a técnica de decisão abrupta no processo de detecção.



**Figura 7.** Taxa de transmissão conjunta máxima dos sistemas CDMA para os canais unipolar, com sinalização podal e ortogonal, e bipolar com decisão abrupta.

#### IV. ESTRATÉGIAS DE CODIFICAÇÃO DE CANAL COM REALIMENTAÇÃO

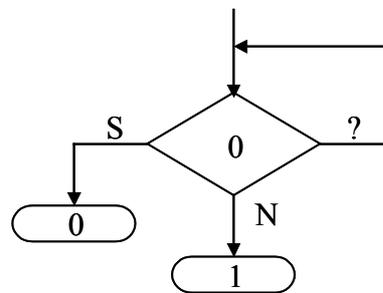
Uma particularidade do canal OU com sinalização unipolar, originado pelo modelo da Figura 5, é que o transmissor pode perscrutar o meio, enquanto o mesmo envia um nível 0 através do canal. Logo, além do transmissor ter certeza que um 1 será recebido com êxito, torna-se possível detectar quando um 0 sofre a interferência de um concorrente. Assim, cada par transmissor/receptor pode utilizar estratégias de decodificação, assumindo que o primeiro possui o conhecimento do estado do receptor.

A estratégia ótima para a codificação de canal no caso de sinalização ortogonal com realimentação, consiste em se repetir o bit a ser transmitido, espalhado temporalmente de acordo com as regras do código adotado, até que o mesmo seja decodificado corretamente, conforme mostrado no fluxograma da Figura 8. Assim, essa estratégia resulta nos respectivos alfabetos de codificação e decodificação.

$$C_O = \left\{ \begin{array}{l} 0: 0,00,000,\dots \\ 1: 1,11,111,\dots \end{array} \right\} \quad (26a)$$

$$D_O = \left\{ \begin{array}{l} 0: 0,?0,??0,\dots \\ 1: 1,?1,??1,\dots \end{array} \right\} \quad (26b)$$

com probabilidades de ocorrência  $1-\beta$ ,  $\beta(1-\beta)$ ,  $\beta^2(1-\beta)$ , etc.. Logo, a eficiência desse código é de 100%, preservando o resultado em (21), isto é,  $R_1=R_0$ .



**Figura 8.** Processo de decodificação para sinalização ortogonal (canal  $\Sigma$ ).

O caso de sinalização podal requer estratégias de codificação adequadas para o canal Z que, no entanto, só podem ser otimizadas conhecendo-se a priori o grau de interferência presente no canal. Entretanto, estratégias simples e relativamente eficientes podem ser estabelecidas, assumindo-se a existência de realimentação do estado do receptor, e questionando-se todas as ocorrências de símbolos iguais a 1 recebidos no canal, isto é, admitindo-se como corretos, apenas, os símbolos 0 recebidos. Assim, os símbolos da fonte  $\{0,1\}$  serão interpretados na recepção como  $\{0,?\}$  e, portanto, a decodificação de qualquer palavra código somente ocorrerá após o recebimento de um zero de confirmação.

A estratégia proposta consiste no mapeamento dos bits da fonte, em um código de comprimento variável, cujos alfabetos de codificação e decodificação podem ser representados, respectivamente, por

$$C_P = \left\{ \begin{array}{l} 0: 0,010,01010,\dots \\ 1: 10,1010,101010,\dots \end{array} \right\} \quad (27a)$$

$$D_P = \left\{ \begin{array}{l} 0: 0, ??0, ???0, \dots \\ 1: ?0, ???0, ?????0, \dots \end{array} \right\} \quad (27b)$$

A Figura 9 ilustra o processo de decodificação para esse código. Para uma fonte de dados binária equiprovável, a probabilidade de ocorrência de cada uma das palavras código será igual a  $1-\alpha$ ,  $\alpha(1-\alpha)$ ,  $\alpha^2(1-\alpha)$ ,

etc.. Assim, o comprimento médio das mesmas pode ser calculado por

$$\bar{n}(\alpha) = \frac{1-\alpha}{2} \sum_{i=0}^{\infty} (4i+3)\alpha^i = \frac{\alpha+3}{2(1-\alpha)}, \quad (28)$$

enquanto que o número médio de zeros enviados através do canal, por bit da fonte, resulta em

$$\bar{n}_0(\alpha) = (1-\alpha) \sum_{i=0}^{\infty} (i+1)\alpha^i = \frac{1}{1-\alpha}. \quad (29)$$

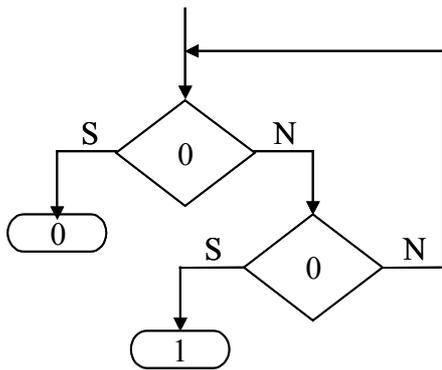
Logo,, a probabilidade de transmissão de um símbolo 0 através do canal será dada por

$$p'_0(\alpha) = \frac{\bar{n}_0(\alpha)}{\bar{n}(\alpha)} = \frac{2}{3+\alpha}, \quad (30)$$

E, finalmente, pode-se determinar que a taxa conjunta do sistema codificado pode ser obtida por

$$R_2(M) = \frac{M}{\bar{n}(\alpha)}, \quad (31)$$

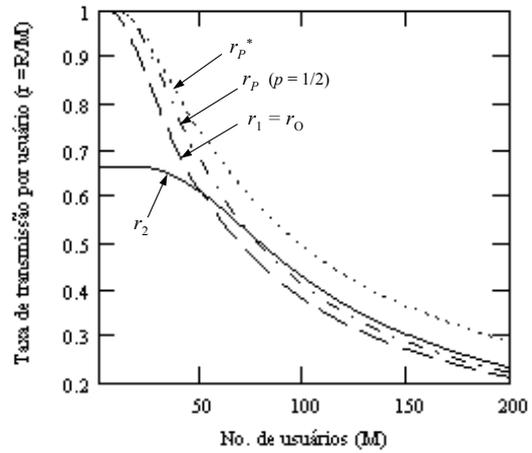
Para os valores de  $\alpha$  que satisfazem, simultaneamente, as equações (14) e (30), para cada valor de  $M$ , conduzindo aos resultados mostrados na Fig. 10.



**Figura 9.** Processo de decodificação para sinalização podal (canal Z).

Observa-se que a eficiência mínima desse código, quando comparado com o caso não codificado com  $p_0=1/2$ , ocorre para  $\alpha=0$ , e é igual a 67%. No outro extremo, como  $p_0'(1)=1/2$ , conclui-se que o sistema atinge uma capacidade idêntica àquela prevista em

(17). Nota-se, também, que apesar da menor eficiência desse sistema quando  $M$  é relativamente pequeno, com o afluxo de novos usuários, a taxa de transmissão individual degrada de modo mais suave, tornando-se mais eficiente que o sistema com sinalização ortogonal e, posteriormente, ultrapassando, também, a taxa de transmissão do sistema não codificado.



**Figura 10.** Taxa de transmissão por usuário para sinalização ortogonal codificado ( $r_1$ ), e podal ( $r_2$ : codificado,  $r_p$ :  $p_0=1/2$ ,  $r_p^*$ : ótimo).

**V. CONCLUSÕES**

A análise da capacidade dos sistemas CDMA em canais unipolares mostra que os mesmos, sob certas condições, podem oferecer uma capacidade superior em relação aos equivalentes bipolares. Esse resultado se justifica porque o canal OU, resultante do emprego da técnica de limitação abrupta na recepção, se comporta como um canal Z ou um canal com apagamento, dependendo do tipo de sinalização empregado, que por sua vez apresentam capacidades superiores ao BSC.

A adoção de sinalização podal conduz a uma capacidade maior para um sistema CDMA unipolar, no entanto, esse potencial só pode ser plenamente alcançado para códigos esparsos.

**REFERÊNCIAS**

[1] J. S. G. Panaro e C. Almeida, “Códigos com salto temporal para aplicações em CDMA ótico,” *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 682-687, set. 1999.  
 [2] J. S. G. Panaro e C. Almeida, “Códigos unipolares para aplicações em CDMA ótico,” *Revista da Soc. Brasileira de Telecomunicações*, vol. 15, pp. 10-24, jun. 2000.  
 [3] J. A. Salehi “Code division multiple access techniques in optical fiber networks – Part I: Fundamental principles”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 824-833, Aug. 1989.

- [4] J. A. Salehi and C. A. Brackett “Code division multiple access techniques in optical fiber networks – Part II: Systems performance analysis”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 834-842, Aug. 1989.
- [5] M. Azizoglu, J. A. Salehi, and Y. Li, “Optical CDMA via temporal codes”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1162-1170, Jul. 1992.

**José Santo Guiscafré Panaro** formou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1980 e cursou a pós-graduação em Engenharia de Comunicação de Dados no Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) em 1995. Atualmente participa do programa de doutorado no Departamento de Comunicações da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP. Atuou como engenheiro de desenvolvimento na indústria de informática entre 1981 e 1994, especialmente na área de armazenamento de dados. Atualmente é professor adjunto do INATEL. Seus interesses de pesquisa incluem a teoria de comunicação, sistemas de múltiplo acesso, processamento de sinais, gravação magnética e criptografia.

**Celso de Almeida** nasceu em Jundiaí, S.P., em 1957. Recebeu o diploma de Engenharia Elétrica, Modalidade Eletrônica, pela UNICAMP em 1980. Recebeu os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica, Modalidade Telecomunicações, também pela UNICAMP em 1983 e 1990, respectivamente. Trabalhou de 1983 a 1990 na Elebra Telecom no desenvolvimento de Sistemas de Comunicações Ópticas. É Professor Concursado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP desde 1990. Recebeu o título de Professor Livre Docente pela UNICAMP em 1998. Seus principais interesses em pesquisa são em CDMA, Comunicações Ópticas, Transmissão Digital, Códigos Controladores de Erros, Criptografia.