

OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE ESTAÇÕES EM REDES

LOCAIS DE FIBRAS ÓTICAS COM BARRAMENTO DUPLO

PAULO HENRIQUE DE AGUIAR RODRIGUES

NÚCLEO DE COMPUTAÇÃO ELETRÔNICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Neste artigo a maximização do número de acopladores óti-
cos para rede local com barramento duplo unidirecional é investi-
gada e três soluções são estudadas: uso de acopladores idênticos,
uso de acopladores simétricos e solução híbrida. Mostra-se que a
solução híbrida apresenta as vantagens de propiciar um número ele-
vado de conexões com um número reduzido de acopladores com coefi-
cientes de acoplamento diferentes.

1. INTRODUÇÃO

Redes locais utilizando fibras óticas têm sido implantadas com diferentes topologias. Basicamente estas implementações podem ser divididas em dois grupos: topologias utilizando circuitos ativos em série com o meio ótico e topologias nas quais apenas elementos passivos intervêm diretamente com a fibra ótica. Como exemplo do primeiro grupo citamos o uso de links óticos nas transmissões, ponto a ponto, de redes em anel {Ping 82} e nas redes ativas em estrela, como Fibernet II {Raws 82} e Novanet {Ping 82}. A principal desvantagem destas topologias ativas reside no decréscimo da confiabilidade do sistema, cujo funcionamento é afetado por falhas isoladas em quaisquer das interfaces em série com o meio ótico. Assim, a alta confiabilidade oferecida pela fibra ótica devido à sua imunidade a interferências eletromagnéticas e isolamento de terra não é determinante da disponibilidade da rede.

Nas topologias óticas passivas a rede em estrela com utilização do protocolo CSMA/CD ("carrier sense multiple access with collision detection") {Meta 76} é a mais comum, tendo sido introduzida em Fibernet II {Raws 78}. A popularidade desta configuração reside na facilidade de fabricação de estrelas passivas com vários braços e baixa perda (mesmo com fibras monomodo {Shee 79}) e na pouca variação da potência recebida de sinais de diferentes estações, o que leva ao estreitamento da faixa dinâmica necessária para cada receptor. Entretanto, a topologia em estrela causa dificuldades operacionais na implantação física da rede e o protocolo CSMA/CD requer que o tempo de transmissão de um pacote de informação seja maior que duas vezes o maior atraso de propagação entre duas estações. Para redes locais abrangendo uma área extensa e utilizando altas taxas de transmissão e tamanho pequeno de pacotes, estas limitações podem tornar a rede inviável.

Uma segunda opção no uso de topologias passivas é a rede em barra. Um dos maiores impecilhos ao uso da barra é a alta perda ("excess loss") dos acopladores óticos, o que reduz bastante o número de conexões possíveis no barramento. Das propostas pa

ra redes locais com barramento unidirecional, algumas topologias utilizam uma barra única {Frat 81, Mars 81, Tsun 82}, enquanto outras optam pelo barramento duplo {Taka 83, Limb 82, Gerl 84, Rodr 84} como mostrado na figura 1. A topologia com barramento duplo tem a vantagem de requerer apenas duas conexões por estação por barra, ao contrário do barramento simples que necessita de três conexões por estação. A diminuição dos pontos de conexão é fundamental para o aumento do número de acopladores na barra.

Embora a tecnologia de componentes para fibra monomodo seja mais recente do que para fibras multimodo, conectores monomodo com perda média de 0.54dB já foram fabricados {Masu 82a}. Também acopladores de campo evanescente foram fabricados com perda tão baixa quanto 0.1dB e permitindo o ajuste dos coeficientes de acoplamento {Bear 83}. Estes resultados mostram um grande progresso na fabricação de acopladores e conectores óticos e tornam viável o desenvolvimento de redes óticas com barramento passivo.

Este artigo visa o estudo da maximização do número de acopladores óticos para redes com barramento duplo através de ajuste dos coeficientes de acoplamento dos taps óticos. Três tipos de soluções são abordadas em sequência: uso de acopladores idênticos, uso de acopladores simétricos e solução híbrida.

2. DEFINIÇÕES

Para a descrição matemática do problema de otimização, adotamos a representação e nomenclatura em {Schm 83}. Na figura 2 são mostrados um tap ótico e conexões para uma estação, enquanto a figura 3 mostra um barramento duplo com N estações.

Taps bicônicos ou de campo evanescente podem ser representados pela seguinte matriz de transmissão {Schm 83}:

$$\begin{bmatrix} P_h \\ P_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-C)\beta & \beta C \\ \beta C & (1-C)\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t \\ P_{in} \end{bmatrix}$$

onde,

C = coeficiente de acoplamento entre fibras (parâmetro a ser determinado) e β = perda ("excess loss") através do acoplador com $L_c(\text{dB}) = 10 \log \beta$.

A fração de potência transmitida através do conector ou solda ("splice") é designada α , com $L_c(\text{dB}) = 10 \log \alpha$. O fator de perda em transmissão devido à atenuação da fibra é representado por η , com $L_f(\text{dB}) = 10 \log \eta$.

Se a potência máxima transmitida é P_t e a potência mínima detetável com confiabilidade é P_d , a fração P_t/P_d é definida como a margem de potência M (atenuação da fibra já incorporada) e pode ser representada em dB como:

$$M(\text{dB}) = P_t(\text{dBm}) - P_d(\text{dBm})$$

Se a potência mínima detetada por um receptor é P_{\min} , a perda máxima no sistema é $L_{\max}(\text{dB}) = 10 \log (P_{\min}/P_t)$, e o balanço de potência simplesmente requer que:

$$M + L_{\max} > 0.$$

O nosso problema de otimização consiste em determinar coeficientes de acoplamento C que maximizem o número de interfaces ligadas diretamente ao barramento, com o balanço de potência satisfazendo a desigualdade acima. Três casos são analisados:

- (1) Coeficientes de acoplamento iguais em todas as conexões implicando em acopladores idênticos;
- (2) Taps de uma mesma estação tem coeficientes de acoplamento iguais, podendo variar de estação para estação. Esta solução dá origem a acopladores simétricos;
- (3) Solução híbrida combinando (1) e (2).

Uma consideração importante em implementações práticas é a faixa-dinâmica (diferença entre a potência máxima e mínima a

ser detetada em dB) em cada receptor. A potência recebida deve estar dentro da faixa dinâmica para se evitar erros ou saturação que acarreta atrasos. A complexidade e sofisticação do receptor aumenta com um aumento da faixa dinâmica. Para uma rede local ser viável os receptores devem ter uma faixa dinâmica estreita. A diminuição da faixa dinâmica é discutida em cada otimização separadamente.

3. OTIMIZAÇÃO COM ACOPLADORES IDÊNTICOS

Neste caso, os taps em todas as interfaces são iguais. Em {Schin 83} mostra-se que a potência mínima recebida ocorre entre estações extremas e P_{min} , neste caso, é representado por:

$$P_{min} = \alpha^{2N-2} C^2 (1-C)^{2N-4} \beta^{2N-2} P_t$$

Demonstra-se facilmente que P_{min} é maximizado para $C=1/(N-1)$ {Schm 83}. A máxima perda correspondente é dada por:

$$L_{max} = L_f + (2N-2) (L_c + L_e) + 20 \log (N-2) + 20 (N-1) \log \left[1 - \frac{1}{N-1} \right].$$

A margem de potência necessária para diferentes valores de L_e e L_c e diferentes números de interfaces, assumindo L_f desprezível, é dada na Tabela 1.

Assumindo valores numéricos para P_t e P_d de 0 dBm e -45 dBm, respectivamente, obtemos uma margem de potência de 45 dB. Para esta margem, o máximo número de estações é mostrado na Tabela 2, cujos valores foram obtidos diretamente da Tabela 1.

Se observarmos a barra ED, a estação N recebe potência mínima da estação 1. A potência recebida das outras estações aumenta à medida que caminhamos em direção a N, assumindo uma potência de saída constante para todas estações. Para diminuir a faixa dinâmica da estação N, as potências de saída das estações 2 a N-1 devem ser ajustadas, ou atenuadores óticos devem ser inseridos em série com os transmissores destas estações. Assumindo que todas

as estações entreguem uma mesma potência à estação N, os receptores das estações 2 a N recebem potência constante em níveis diferentes. Para que os vários receptores recebam num mesmo nível de potência, atenuadores óticos são necessários na entrada de cada receptor.

4. OTIMIZAÇÃO COM ACOPLADORES SIMÉTRICOS

Em um acoplador simétrico, os dois taps (transmissor e receptor) tem os mesmos parâmetros C e β . Um acoplador simétrico com conectores nas extremidades para conexão à barra possui uma matriz de transmissão correspondente dada por:

$$\begin{bmatrix} P_r \\ P_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha\beta C_i \\ \alpha\beta C_i & \alpha^2\beta^2(1-C_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_t \\ P_{in} \end{bmatrix}$$

A maximização do número de acopladores quando o fator de acoplamento C é ajustado ao longo do barramento foi solucionado por Attman e Taylor {Altm 77} e por Auracher e Witte {Aura 77} para acopladores multimodo planos do tipo "Tee" que apresentam uma matriz de transmissão mais simples do que a matriz apresentada pelos acopladores simétricos que possui dependências de segundo grau. Seguindo passos semelhantes, vamos estender a análise para o nosso caso de interesse.

Sem perda de generalidade, focalizaremos a barra DE. O primeiro passo no processo de otimização consiste de implementação de um processo recursivo que se inicia na estação N e se move em direção de estações com índice decrescente. Assumindo $P_r = P_s$ e $C_n = 1$ na estação N, a potência mínima antes da estação N-1 é encontrada escolhendo C_{n-1} de tal forma que $P_r = P_s$ (na estação N-1). Desta forma, somente a potência indispensável é absorvida antes de se alcançar a estação N. Este procedimento é repetido recursivamente até que uma estação índice m é alcançada para a qual o seu transmissor não consegue injetar a potência mínima calculada

para a estação anterior $m+1$.

Chamando P_i o nível de potência observado na barra a meio caminho dos conectores ou soldas ("splices") das estações i e $i-1$, podemos escrever o seguinte:

$$P_n = \frac{P_\delta}{\alpha\beta} \quad (1)$$

$$P_{i-1} = \frac{P_i}{\alpha^2\beta^2(1-C_{i-1})^2} \quad (2)$$

$$P_{i-1} = \frac{P_\delta}{C_{i-1}\alpha\beta} \quad (3)$$

Eliminando P_δ , obtemos:

$$\frac{(1-C_{i-1})^2}{C_{i-1}} = \frac{1}{\alpha^2\beta^2 C_i}, \text{ para } C_i < 1, C_n = 1 \quad (4)$$

Definindo $b = \frac{1}{\alpha^2\beta^2 C_i}$, a solução para C_{i-1} é:

$$C_{i-1} = \frac{2 + b - \sqrt{(2+b)^2 - 4}}{2} \quad (5)$$

Observamos que $C_{i-1} < C_i$. Consequentemente, uma potência cada vez menos é transferida de P_t para P_{out} . Nota-se também que os valores de C_i são independentes de P_δ ou P_t . A estação limite m é alcançada quando $P_t \alpha \beta C_m < P^{m+1}$, com (4) não podendo ser utilizada para determinar C_m . P^{m+1} é a potência mínima que garante $P_t = P_\delta$ na estação N .

Em um segundo passo, começamos com $C_1 = 1$ para a estação 1 e calculamos os coeficientes de acoplamento para a estação 2 de forma que, na saída do acoplador da estação 2, os sinais transmitidos por cada uma das duas estações tenham a mesma potência. Proceda-se recursivamente até que se atinja a estação l tal que P^{l+1} é menor que o requisito mínimo P^{m+1} calculado no primeiro passo. Desenvolvendo as expressões para esta recursão, descobrimos que os novos C_i 's ainda obedecem (4). Consequentemente, os acopladores são simétricos e $C_i = C_{n-i+1}$. O ponto médio do barramento está loca

lizado entre as estações $N/2$ e $N/2+1$.

É interessante notar que todas as estações à direita do ponto médio recebem igual potência P_δ de todas as estações situadas à esquerda do ponto mediano. Para equalizar a faixa dinâmica de todas as estações, é necessário somente atenuar o sinal recebido nas estações 2 a $N/2$ e ajustar a potência de saída das estações $N/2+1$ a $N-1$. Comparando-se com o caso anterior, apenas metade dos sinais devem ser compensados.

Dado P_δ/P_t e os fatores de acoplamento calculados através de (4), o número máximo de estações no barramento é dado por $N=2n$, onde n é o menor inteiro a satisfazer a seguinte desigualdade:

$$C_n \quad C_{n+1} < \frac{P_\delta/P_t}{\alpha^2 \beta^2} \quad (6)$$

Para uma margem de potência $M=45$ dB, $L_0=0$, e diferentes valores de $L=L_e+L_c$, o máximo número de estações é mostrado na Tabela 3. Comparando estes valores com os obtidos para o caso de acopladores idênticos, um ganho de aproximadamente 2 é alcançado.

A desvantagem desta otimização é a necessidade de $N/2$ acopladores com diferentes coeficientes de acoplamento. Embora estes coeficientes sejam independentes de M , a rede não pode ser facilmente expandida porque os coeficientes de acoplamento correspondem ao posicionamento físico da estação no barramento. Uma solução para este problema é apresentada na próxima seção.

5. OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA

Para se evitar o problema do grande número de acopladores com diferentes coeficientes de acoplamento, investigamos uma solução híbrida na qual um igual número de estações de cada lado do barramento tem coeficientes de acoplamento dados por (4), e todas as outras soluções tem um mesmo coeficiente de acoplamento.

Como no caso de acopladores simétricos, focalizamos a barra DE. Assumimos a organização mostrada na figura 4. Os blocos terminais contem k estações cada, com coeficiente de acoplamento C_i otimizado de acordo com (4). O bloco central n estações com o mesmo fator de acoplamento C. Naturalmente, $N=2k+n$. A potência dos transmissores e a sensibilidade dos receptores é a mesma que antes, e a atenuação da fibra é também desprezada. Para um dado k, queremos encontrar um limite inferior para C, denominado C_{min} , que permita o maior número de estações no bloco central e, consequentemente, em toda a rede.

Na análise abaixo P_i é definido como nas seções anteriores. P_{in}^b indica a potência que entra no conector da primeira estação do bloco central e é igual a P_{k+1} . P_{out}^b indica a potência na saída do conector da última estação do bloco central e é igual a P_{n+k+1} . Por causa dos procedimentos anteriores, as primeiras k estações produzem P_{in}^b tal que:

$$P_{in}^b = C_k \alpha \beta P_t \quad (7)$$

Para produzir os níveis mínimos de potência no último bloco, P_{out}^b deve satisfazer a seguinte desigualdade:

$$P_{out}^b > \frac{P_s}{C_k \alpha \beta} \quad (8)$$

Para satisfazer (8) para uma dada potência de entrada P_{in}^b , devemos ter:

$$P_{in}^b \{ \alpha^2 \beta^2 (1-C)^2 \}^n > \frac{P_s}{C_k \alpha \beta} \quad (9)$$

Usando (7) na desigualdade acima e tomando o logaritmo de ambos os lados, obtemos:

$$n < \frac{\ln \frac{P_s/P_t}{\alpha^2 \beta^2 C_k^2}}{\ln \alpha^2 \beta^2 (1-C)^2} \quad (10)$$

Uma outra condição requer que a última estação no bloco central receba a potência mínima P_{δ} de uma potência de entrada P_{in}^b . Assim:

$$P_{in}^b \{ \alpha^2 \beta^2 (1-C)^2 \}^{n-1} > \frac{P_{\delta}}{C \alpha \beta} \quad (11)$$

Usando (7) e (11) obtemos:

$$\frac{(1-C)^2}{C} \leq \frac{1}{\alpha^2 \beta^2 C_k} \quad (12)$$

Porque o lado esquerdo é uma função decrescente de C , para $0 < C < 1$, e comparando a equação (12) com a equação (4), concluimos que:

$$C_{min} = C_k + 1 \quad (13)$$

A equação (13) é equivalente a requerer que a primeira estação do bloco central produza P_{out}^b satisfazendo (8). Observamos também que se (13) é verdadeira, qualquer caminho entre um transmissor e um receptor dentro do bloco central satisfaz os requisitos da potência mínima.

A equalização do sinal nos receptores requer que atenuadores sejam adicionados a todos os transmissores e receptores, exceto para a estação 1 e os receptores no último bloco. Se $k \ll N$, o custo é aproximadamente o mesmo que no caso de acopladores idênticos.

A tabela 4 mostra o número máximo de estações para diferentes valores de k e L . Comparando os valores de N_{max} com os da tabela 2, notamos que a solução híbrida é sempre melhor do que a solução para acopladores idênticos para $k > 3$, dentro dos parâmetros escolhidos. Assim, otimizando somente uns poucos acopladores pode levar a uma melhoria substancial no número máximo de estações permitidas. Por exemplo, para $k=5$, há um aumento de ~ 9 em N_{max} para todo L . A solução híbrida representa uma melhoria em comparação com a solução simétrica no sentido de que um pequeno

conjunto de fatores de acoplamento é necessário, e inserções no bloco central não afetam a conexão das outras estações.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento dos processos da fabricação de tap óticos tem possibilitado o surgimento de acopladores óticos passivos com baixa perda e com coeficientes de acoplamento variável. Este progresso nos acopladores aliado à existência de conectores de baixa perda, torna possível o surgimento de redes de fibras óticas em barra totalmente passivas, com possibilidade de conexão de várias estações. A passividade do sistema aumenta a confiabilidade e simplifica o hardware.

Neste artigo a maximização do número de acopladores óticos em rede com barramento duplo unidimensional é investigada e três soluções são estudadas: acopladores idênticos, simétricos e soluções híbrida. Mostre-se que a solução híbrida apresenta as vantagens de propiciar um número elevado de conexões com um número reduzido de acopladores com coeficientes de acoplamento diferentes. A existência de um bloco central de estações com coeficiente igual de acoplamento facilita a inserção e eliminação de estações na rede. A independência dos fatores de acoplamento da margem de potência disponível no sistema é fundamental para a estabelecimento da rede independentemente da tecnologia usada nos transmissores e receptores.

7. REFERÊNCIAS

{ALTM 77} - ALTMAN, D.E. AND H.F. TAYLOR, An Eight - Terminal Fiber Optics Data Bus Using Tee Couplers: Crane, Russack & Company, Inc., 1977;

{AURA 77} - AURACHER, F. AND H.H. WITTE, "Optimized Layout for a Data Bus System Based on a New Planar Access Coupler"

- Applied Optics, Vol. 16, No. 12, December 1977, pp. 3140-3142;
- {BEAS 83} - BEASLEY, J.D., D.R. MOORE, AND D.W. STOWE, "Evanescent wave Fiber Optic Couplers: Three Methods", in Proceedings 1983 SPIE Symposium on Fiber Optics Multiplexing and Modulation - Vol. 417, Arlington, VA: April 1983, pp. 36-43;
- {FRAT 81} - FRATTA, L., F. BORGONOVO, AND F.A. TOBAGI, "The EXPRESSNET: A Local Area Communication Network Integrating Voice and Data", in Proceedings International Conference on Performance of Data Communication Systems and Their Applications, Paris, France: September, 1981;
- {GERL 84} - GERLA, M., P. RODRIGUES, AND C. YEH, "U-Net: A Unidirectional Fiber Bus Network", in Proceedings Fiber Optic Communications Local Area Networks (FOC/LAN 84), Las Vegas, NY: September, 17-21, 1984;
- {LIMB 82} - LIMB, J.O. AND C. FLORES, "Description of Fasnet - A Unidirectional Local-Area Communications Network", The Bell System Technical Journal, Vol. 61, No. 7, September 1982, pp. 1413-1440;
- {MARS 81} - MARSAN, M.A. AND G. ALBERTENGO, "C-Net: A Local Broadcast Communication Network Architecture", C.N.R. Progetto Finalizzato Informatica, Sottoprogetto P 1, April 1981;
- {MASU 82a} - MASUDA, S. AND T. IWAMA, "Low-loss lens Connector for single-mode fibers", Applied Optics, Vol. 21, No. 19, October 1982, pp. 3475-3483;
- {METC 76} - METCALFE, R. AND D. BOGGS, "ETHERNET: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks", Communications of the ACM, Vol. 19, No. 7, July 1976, pp. 395-404;
- {PING 82} - PINGRY, J., "Local Area Networks in Fiber", IFOC, Summer 1982;
- {RAWS 78} - RAWSON, E.G. AND R.M. METCLAFE, "Fibernet I: Multi-mode Optical Fiber for Local Computer Networks", IEEE Transactions on Communications, July 1978;

{RAWS 82} - RAWSON, E.G. AND R.V. SCHMIDT, "FIBERNET II: An ETHERNET-Compatible Fiber Optic Local Area Network", in Proceedings 82 Local Net, Los Angeles, CA: 1982, pp. 42-46;

{RODR 84} - RODRIGUES, P., L. FRATTA, AND M. GERLA, "Tokenless Protocols for Fiber Optics Local Area Networks", in Proceedings 1984, IEEE International Conference on Communications (ICC'84) - Vol. 3, Amsterdam, Netherlands: May 14-17, 1984 pp. 1150-1153;

{SCHM 83} - SCHMIDT, R.V., E.G. RAWSON, R.E. NORTON JR., S.B. JACKSON, AND M.D. BAILEY, "Fibernet II: A Fiber Optic Ethernet", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-1, No. 5, November 1983, pp. 702-711;

{SHEE 79} - SHEEM, S.K. AND T.G. GIALLORENZI, "Single-mode Fiber Multiterminal Star Directional Coupler", Appl. Phys. Lett., Vol. 35, No. 2, July 1979, pp. 131-133;

{TAKA 83} - TAKAGI, A., S. YAMADA, AND S. SUGAWARA, "CSMA-CD with Deterministic Contention Resolution", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-1, No. 5, November 1983, pp. 877-844;

{TSEN 82} - TSENG, C. AND B. CHEN, "D-Net: A New Scheme for High Data Rate Optical Local Area Networks", in Proceedings Globecom 82, Miami, FL.: November/December 1982, pp. 949-955.

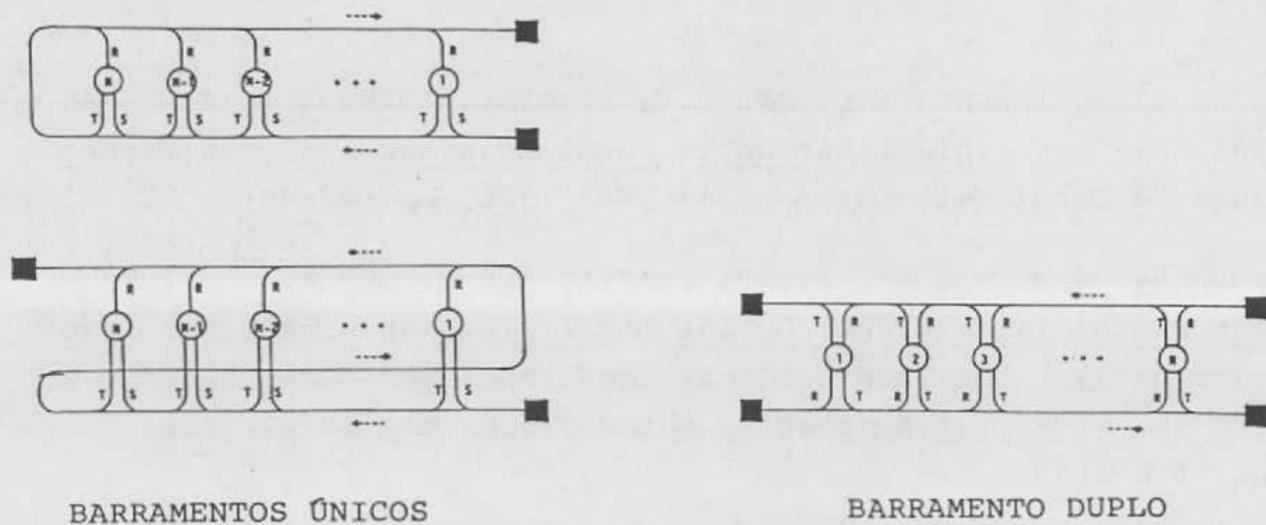


FIGURA 1 - TOPOLOGIAS EM BARRA

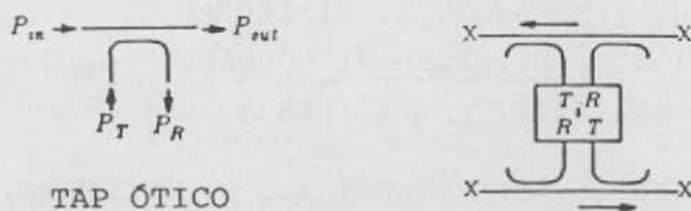


FIGURA 2 - TAP ÓTICO E CONEXÕES PARA UMA ESTAÇÃO

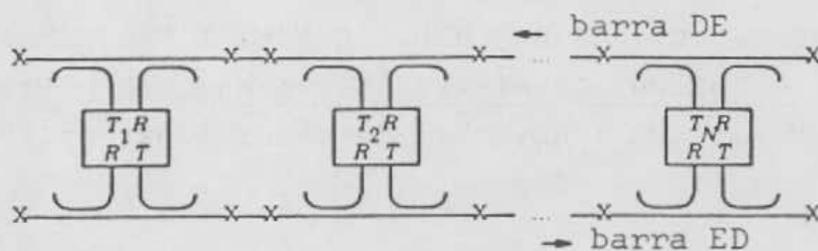


FIGURA 3 - BARRAMENTO DUPLO COM N ESTAÇÕES

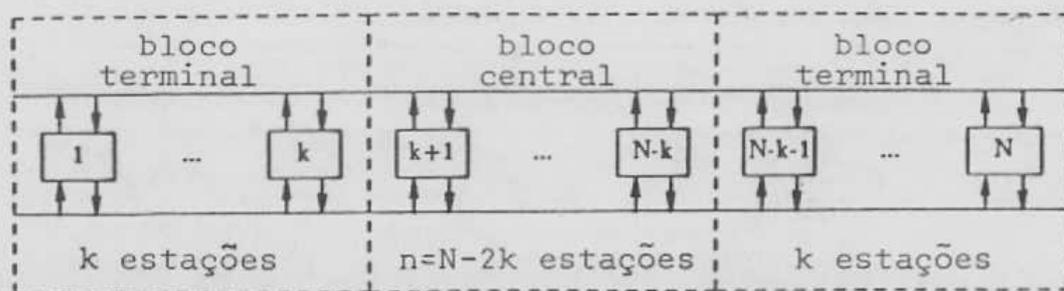


FIGURA 4 - ORGANIZAÇÃO EM 3 BLOCOS

$L = L_1 + L_2, L_1 = 0$					
N	$L = -0.2 \text{ dB}$	$L = -0.4 \text{ dB}$	$L = -0.6 \text{ dB}$	$L = -0.8 \text{ dB}$	$L = -1.0 \text{ dB}$
3	13.04	14.04	15.04	16.04	17.04
4	17.99	19.39	20.79	22.19	23.59
5	21.34	23.14	24.94	26.74	28.54
6	23.93	26.13	28.33	30.53	32.73
7	26.08	28.68	31.28	33.88	36.48
8	27.94	30.94	33.94	36.94	39.94
9	29.58	32.98	36.38	39.78	43.18
10	31.07	34.87	38.67	42.47	46.27
11	32.44	36.64	40.84	45.04	49.24
12	33.71	38.31	42.91	47.51	52.11
13	34.90	39.90	44.90	49.90	54.90
14	36.02	41.42	46.82	52.22	57.62
15	37.09	42.89	48.69	54.49	60.29
16	38.11	44.31	50.51	56.71	62.91
17	39.09	45.69	52.29	58.89	65.49
18	40.03	47.03	54.03	61.03	68.03
19	40.95	48.35	55.75	63.15	70.55
20	41.85	49.63	57.43	65.23	73.03
21	42.69	50.89	59.09	67.29	75.49
22	43.52	52.12	60.72	69.32	77.92
23	44.33	53.33	62.33	71.33	80.33
24	45.13	54.53	63.93	73.33	82.73
25	45.91	55.71	65.51	75.31	85.11

TABELA 1 - MARGEM DE POTÊNCIA PARA N ACOPLADORES IDÊNTICOS

$M = 45 \text{ dB}, L_1 = 0$	
$L = L_1 + L_2$	N_{max}
-0.2	23
-0.4	16
-0.6	13
-0.8	10
-1.0	9

TABELA 2 - N_{max} PARA OTIMIZAÇÃO COM ACOPLADORES IDÊNTICOS.

$M = 45 \text{ dB. } L_1 = 0$	
$L = L_1 + L_2$	N_{max}
-0.2	50
-0.4	32
-0.6	24
-0.8	20
-1.0	18

TABELA 3 - N_{max} PARA OTIMIZAÇÃO COM ACOPLADORES SIMÉTRICOS

$M = 45 \text{ dB. } L = L_1 + L_2, L_1 = 0$										
k	$L = -0.2 \text{ dB}$		$L = -0.4 \text{ dB}$		$L = -0.6 \text{ dB}$		$L = -0.8 \text{ dB}$		$L = -1.0 \text{ dB}$	
	n	N_{max}								
1	10	12	9	11	9	11	8	10	8	10
2	14	18	13	17	12	16	10	14	9	13
3	18	24	15	21	13	19	11	17	9	15
4	20	28	16	24	13	21	10	18	8	15
5	22	32	16	25	12	22	9	19	7	17
6	23	37	16	28	11	23	8	20	5	17
7	24	40	15	29	10	24	6	20	3	17

TABELA 4 - N_{max} PARA OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA