

1 Hierarquia digital plesiócrons (PHD)

1.1 Multiplexagem no domínio temporal

(TDM – Time Division Multiplexing)

1.1.1 Multiplexagem de sinais analógicos

Quando a capacidade de um canal de comunicação for superior ao requerido para a transmissão de um único sinal, o canal pode ser utilizado para transmitir simultaneamente vários sinais, este processo é conhecido por multiplexagem.

A Figura 1-1 ilustra o funcionamento de um sistema de multiplexagem no domínio temporal (Time Division Multiplexing – TDM), vários sinais são filtrados e amostrados sequencialmente. O sistema de amostragem sequencial aqui representado por um comutador mecânico que roda à frequência f_s , cada rotação completa tem uma duração T_s , durante T_c segundos está comutado para um dos sinais. O domínio temporal é assim dividido em intervalos de tempo de são atribuídos aos diferentes sinais. No receptor as diferentes amostras são distribuídas por outro comutador. Para que o sistema funcione é necessários que os comutadores do emissor e receptor estejam sincronizados. A sincronização é sem dúvida um dos aspectos mais importantes de um sistema TDM.

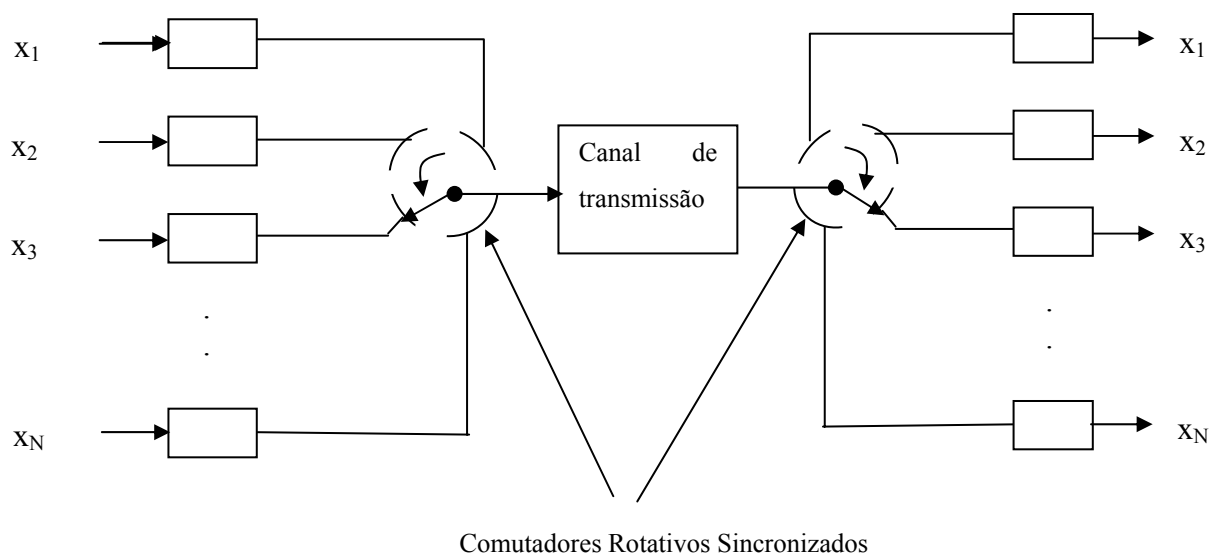
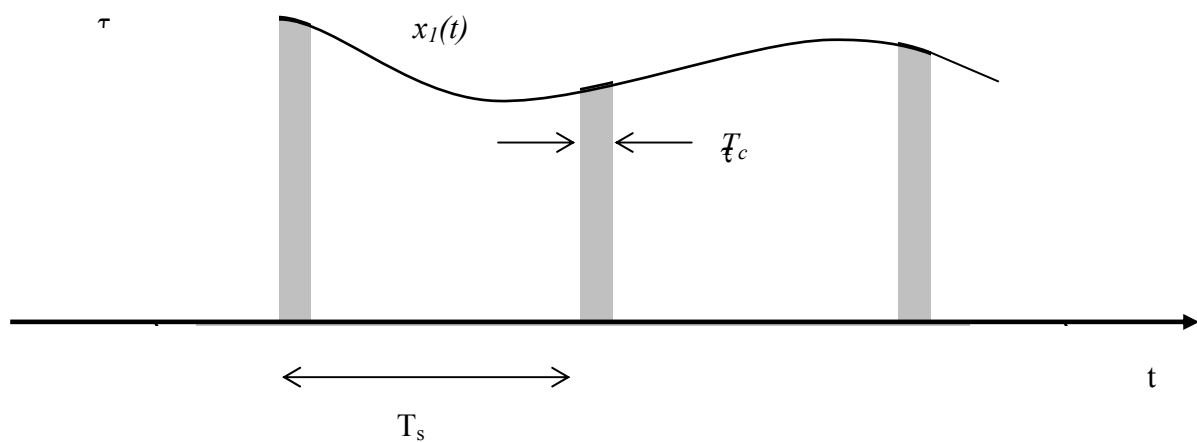
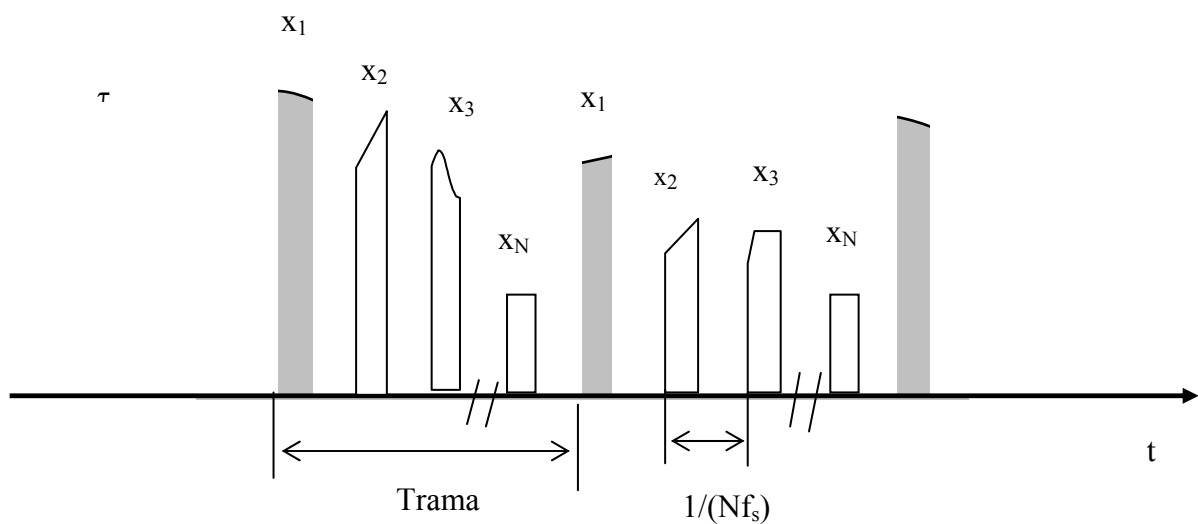


Figura 1-1 Sistema TDM.



a)



b)

Figura 1.1-2 Funcionamento ilustrativo de um sistema TDM. a) Sinal x_I . b) N sinais multiplexados no tempo.

1.1.2 Multiplexagem de sinais digitais

Como no caso de sinais analógicos a multiplexagem de sinais digitais consiste em combinar bits (símbolos) provenientes de várias fontes de informação (possivelmente com diferentes taxas de transmissão) e combinar os bits de modo a obter um agregado

de símbolos de elevada taxa de transmissão, que utilize eficientemente um canal de grande largura de banda. A combinação de bits pode ser realizada bit a bit, ou então a combinação é feita com conjuntos de bits (palavras) provenientes de diferentes fontes. Para que seja possível recuperar o sinal no destino é necessário que o sinal multiplexado As funções básicas de um MUX (circuito que realiza a multiplexagem de vários sinais) são:

1. Estabelecer a trama, ou seja o menor intervalo de tempo que contém pelo menos 1 bit de cada sinal digital;
2. Atribuir a cada entrada um determinado número de intervalos de bit em cada trama;
3. Inserir bits de controlo e sincronismo de trama;
4. Estabelecer mecanismos capazes de compensarem possíveis variações das taxas de transmissão.

Variações da taxa de transmissão dos vários sinais de entrada do multiplexer é provavelmente um dos aspectos mais delicados em TDM, assim podemos considerar basicamente três tipos de multiplexers:

Síncronos: quando existe um temporizador de comando (Master Clock) que governa todas as fontes, eliminando-se assim as diferenças de taxas de transmissão entre as várias fontes. Este tipo de multiplexers são muito eficientes no entanto necessitam de esquemas elaborados para a distribuição do sinal de temporização de comando.

Asíncronos: são utilizado para fontes digitais que operam em modo start/stop, produzem rajadas de bits com tempo variável entre rajadas. Através da utilização de buffers é possível integrar esses sinais em sistemas síncronos.

Quasi-ásíncronos: utilizados quando as taxas de transmissão das fontes são idênticas, mas sofrem ocasionalmente pequenas variações dentro de certos limites.

1.2 Hierarquia digital plesiócrona (PHD)

PHD – Plesochronous digital hierarchy

1.2.1 Sistemas de multiplexagem primários

Um sinal de voz ocupa uma largura de banda de frequência que vai desde 0 a ~20 kHz. No entanto, para se garantir intelegibilidade, basta enviar a potência contida numa banda mais estreita (típicamente desde 330 a 3.6 kHz). Como já estudamos anteriormente um sinal de largura de banda limitada ($0, W$) Hz pode ser amostrado e, a partir das amostras obtidas, pode ser novamente recuperado, se a frequência de amostragem for $f_s \geq 2W$ (teorema de Nyquist).

Para a multiplexagem de sinais de voz, a nível internacional são usados dois sistemas de multiplexagem, que têm a particularidade de serem incompatíveis entre si: o sistema Europeu designado por CEPT1, definido pela Conference of European Post and Telecom (CEPT) e o sistema americano designado por DS1 (Digital Signal-1) em ambos os sistema a frequência de amostragem é de 8 kHz e cada amostra é codificado através de PCM com 8 bits por amostra. Assim, depois da digitalização o débito binário é de 64 kbit/s. As sequências de 8 bits correspondentes a uma amostra de cada conversa, são enviadas de 125 em 125 μ s. O intervalo de tempo que é utilizado para enviar um

esses conjuntos de 8 bits designa-se por fatia de tempo ou mais usualmente o termo inglês *timeslot*. Ao conjunto de *timeslots* que ocorrem durante os 125 μ s dá-se o nome de trama em inglês *frame*.

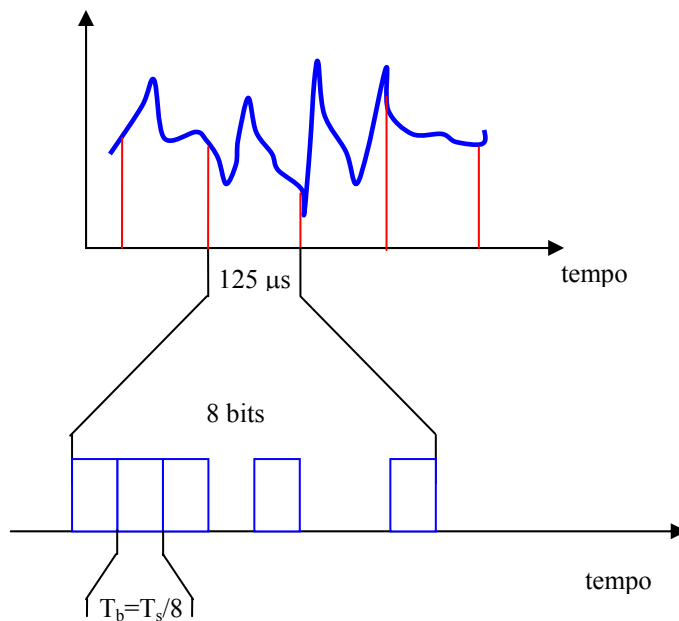
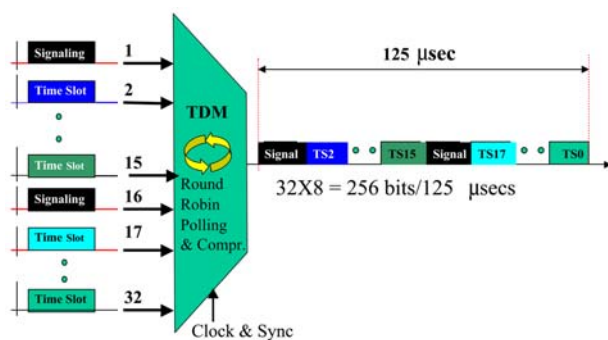


Figura 1-3 Digitalização de um sinal de voz. O débito binário é de 64 kbit/s.

Na rede telefônica tradicional, o telefone converte o sinal de voz (acústico) num sinal eléctrico que é transmitido através de um par de fios para um sistema de comunicação onde um CODEC (codificador/descodificador) o transforma num sinal digital. Um CODEC é um circuito cuja função é converter um sinal analógico num sinal digital e vice versa. A partir da fase em que o sinal é digital, adicionalmente à voz, podemos ter outros tipos de aplicações também em formato digital, vídeo, dados, etc.

A interface utilizador-rede (UNI – User-to-Network Interface) é a interface onde o sinal do assinante de 64 kbit/s encontra a rede. À UNI chegam sinais de vários utilizadores, estes sinais são então multiplexados byte a byte sequencialmente, e a taxa de transmissão do agregado à saída do multiplexador é actualizada, o importante é que os bits correspondentes a cada amostra de um determinado sinal apareçam de 125 μ s em 125 μ s, como se mostra na figura. No sistema de multiplexagem utilizado na Europa o primeiro nível da hierarquia digital CEPT1 suporta 32 canais telefónicos enquanto o sistema Americano designado por DS1 (Digital –Signal) suporta 24 canais. A tabela resume as características do sistema Europeu e Americano.

No sistema Europeu a trama é dividida em 32 *time slots*, cada um com 8 bits, de modo que o débito binário é de $8 \times 8 \times 32$ kbit/s = 2.048 Mbit/s.



1.2.2 Característica da trama CEPT1

A Figura 1-4 ilustra a estrutura da trama CEPT1.

- A trama é dividida em 32 *time slots*, cada um com 8 bits;
- A taxa de transmissão é de $8 \times 8 \times 32 \text{ kbit/s} = 2.048 \text{ Mbit/s}$;
- O *time slot* 0, das tramas ímpares, é destinado ao padrão de enquadramento de trama (PET);
- Os *time slots* de 1-15 e de 17-31 são destinados a canais de voz;
- O *time slot* 16 é destinado para sinalização dos canais de voz;
- A sinalização de cada canal é transmitida utilizando 4 bits, são transmitidos assim a sinalização de 2 canais por trama, sendo necessárias 15 tramas para se transmitir sinalização respeitante aos 30 canais de cada trama. A essas tramas é adicionada uma outra de modo a formar-se uma *multitrama*, constituída por 16 tramas.
- O padrão de enquadramento da multitrama situa-se no time slot 16 de décima-sexta trama.
- Cada canal tem á sua disposição para a sinalização de 4 bits de 2 em 2 ms ($16 \times 125 \mu\text{s}$)

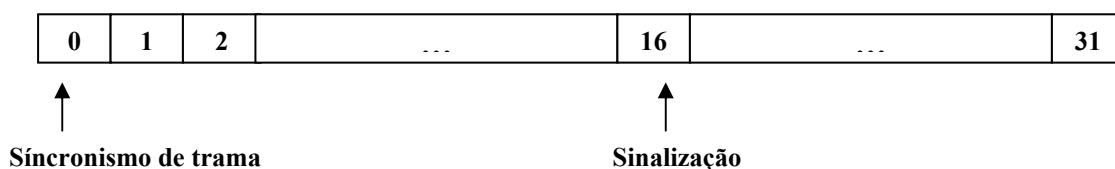
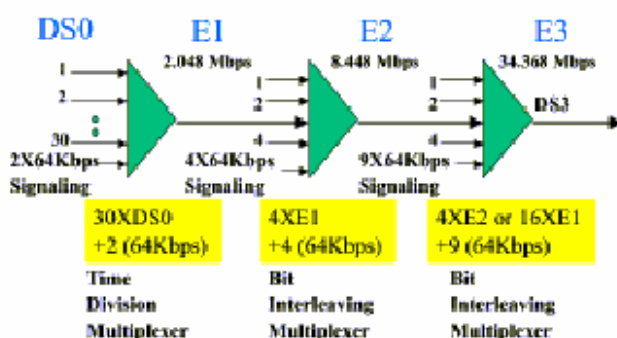


Figura 1-4 Estrutura da trama CEPT1.

1.3 Hierarquias digital plesiócrona

Os sistemas de multiplexagem primários são usados como um bloco básico para a construção de sistemas de multiplexagem de ordem superior, estruturados segundo um esquema hierárquico bem definido. Em cada nível hierárquico, diferentes sequências binárias, conhecidas como tributários são combinadas usando um multiplexer. A saída desse multiplexer origina um sinal que funciona como tributário para o multiplexer de ordem hierarquia seguinte.

Na primeira geração dos sistemas de multiplexagem digitais de ordem superior os diferentes tributários não estão geralmente perfeitamente sincronizados. Embora todos tenham a mesma taxa de transmissão nominal, como as suas fontes de origem são controladas por relógios distintos e independentes, será de esperar ligeiras flutuações nesses débitos dentro dos limites impostos pela tolerância dos relógios. Esses tributários designam-se por *plesiócronicos* e a hierarquia que lhes corresponde é a *hierarquia digital plesiócrona*, (PDH, plesiochronous digital hierarchy).



No 1º nível de multiplexagem os 30 canais são multiplexados byte a byte como referido anteriormente, no entanto nas hierarquias seguintes os sinais são multiplexados bit a bit. O sinal E2 é constituído por 4 sinais E1 de 2,048 bit/s resultante num débito binário de 8,448 Mbps.

	AT & T		CCIT	
	Nº de canais de entrada	Taxa de transmissão de saída (Mbit/s)	Nº de canais de entrada	Taxa de transmissão de saída (Mbit/s)
1º nível	24	1,544	30	2,048
2º	4	6,312	4	8,448
3º	7	44,736	4	34,368
4º	6	274,176	4	139,264

Tabela 1.1 Hierarquia plesiócrona

A partir da Tabela 1.1 nota-se que o débito binário do sinal resultante da multiplexagem de N tributários é superior ao débito binário obtido multiplicando por N os débitos binários de cada um dos tributários. Isto acontece porque foram adicionados bits adicionais pelas seguintes razões:

- Para enquadramento de trama (PET - padrão de enquadramento de trama)
- Necessidade de realizar *justificação* da trama. A justificação de trama é necessária a fim de garantir uma operação correcta dos multiplexadores e

desmultiplexadores, mesmo no caso em que o débito binário dos diferentes tributários fluctua relativamente ao seu valor nominal.

1.3.1 Acomodação das flutuações dos tributários

A constituição de um sinal de multiplexagem de ordem N requer que as tramas dos sinais dos tributários de ordem $N-1$ estejam perfeitamente sincronizadas quer em frequência com em fase. Como nos sistemas reais isto não acontece, será necessário antes da operação de multiplexar utilizar memórias com capacidade de armazenar uma trama (L bits), esta memória é designada normalmente por memória elástica. A memória elástica é escrita ao ritmo f_k , determinado pelo relógio extraído do canal k e é lida ao ritmo f_0 , imposto pelo relógio interno do multiplexer de ordem N .

Nos sistemas plesiócrons é pouco provável que f_k seja igual a f_0 . Então se f_k é maior que f_0 , pode acontecer que uma nova palavra seja escrita na memória antes da anterior ter sido lida. Neste caso a palavra será perdida. Na situação oposta f_k menor que f_0 a leitura poderá acontecer antes da escrita, sendo por conseguinte lida a trama precedente, para evitar esta situação utiliza-se a técnica de justificação ou aposição de bits, esta técnica consiste em inserir de tempos a tempos na sequência binária à saída do multiplexer um bit não portador de informação (bit de aposição ou de justificação).

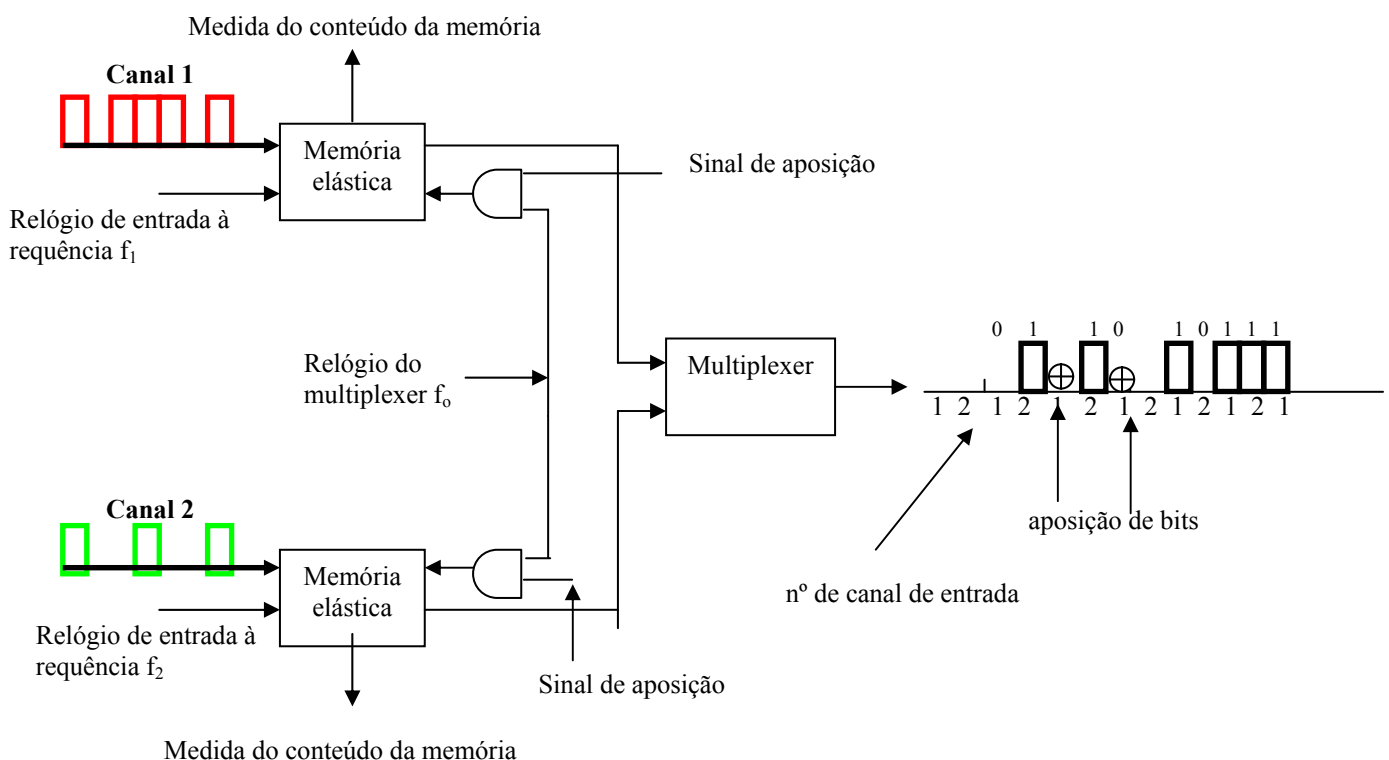


Figura 1-5 Inserção de bits de aposição.

A Figura 1-5 ilustra a situação em que o relógio do canal 1 (f_1) se atrasa em relação ao relógio do multiplexador (f_0). Em consequência o conteúdo do buffer desce abaixo de um valor limiar, esta situação vai activar a não leitura do buffer e a colocação de um espaço

livre na trama de saída, este espaço livre é preenchido por um bit de aposição que poderá ser '0' ou '1'. Quando o conteúdo do buffer sobe acima do limiar, o processo de multiplexagem do canal 1 retoma o funcionamento normal.

Antes da operação de inserção do bit de aposição, a localização do referido bit é codificada em bits existentes na trama para esse fim, que se designam por bits de indicação de justificação.

Se a existência de um bit de aposição é decidida erradamente então toda a trama primária ficará errada.

Para proteger o sistema para que possíveis erros de transmissão, usa-se um padrão de mais de 1 bit para indicar a existência ou não de bit de aposição. O padrão mais usado é de 3 bits (bits C), sendo usada na recepção uma decodificação baseada na maioria. Isto significa, que a maioria dos C bits, neste caso dois em três, determina se o padrão transmitido foi 000, ou 111. Tem-se que probabilidade de se tomar uma decisão errada sobre a existência de bit de aposição é

$$P_e = \sum_{i=(C+1)/2}^C \binom{C}{i} p^i (1-p)^{C-i} \quad (1.1)$$

A probabilidade de um bit estar errado é p , logo a probabilidade de um bit estar certo (não errado) é $1-p$. Um conjunto de C bits com i bits errados e $C-i$ bits certos tem probabilidade de acontecer $p^i(1-p)^{C-i}$. Como num conjunto de C bits há $\binom{C}{i}$ maneiras possíveis dos i bits errados e $C-i$ bits certos estarem localizados, temos que a P_e , a probabilidade que um conjunto de C bits indique a existência de bit de aposição e este não exista é dado pela equação (1.1).

Por exemplo 1 bit errado num conjunto de 3 bits, neste caso existem 3 possibilidades
cce
cec
ecc

ou seja $\binom{3}{1} = 3$

Para $p \ll 1$, o primeiro termo da série é dominante (a probabilidade de existir poucos bits errados numa palavra de C bits predomina) e temos que

$$P_e = \binom{C}{\frac{C+1}{2}} p^{\frac{C+1}{2}} = \frac{C!}{\left(\frac{C-1}{2}\right)! \left(\frac{C+1}{2}\right)!} p^{\frac{C+1}{2}} \quad (1.2)$$

Para $C=3$ temos que $P_e = 3p^2$.

Exemplo: Considere que usa uma segunda hierarquia europeia e que cada canal de transmissão conduz a uma probabilidade de erro de 10^{-5} . Para cada um dos canais CEPT1 determine o tempo médio entre erros.

Usando a formulação anterior conclui-se que $Pe \sim 3 \times 10^{-10}$, ou seja cada canal CEPT1 em média 3 tramas em cada 10^{10} estão erradas. Se se atender que a duração de uma trama CEPT2 é de $100.4 \mu s$ então o tempo médio entre erros é de aproximadamente 93 horas.

Vamos agora analisar se a aposição de um bit por cada canal de entrada em cada trama, é suficiente para acomodar uma variação de taxa de transmissão δ . Vamos considerar que existem m sinais a multiplexar, cada um a transmitir à frequência f_1 bit/s. Cada trama é composta por X bits de controlo e I bits de informação. Se a variação fraccional máxima de f_1 for δ , a frequência de relógio do multiplexer que consegue acomodar o aumento da frequência dos relógios de todas as entradas é dada por:

$$f_0 = mf_1(1 + \delta) \frac{I + X}{I} \quad (1.3)$$

Considerando $\delta=0$ e $X=0$, neste caso o multiplexer não introduz bits adicionais de sincronismo e/ou de controlo a taxa de transmissão à saída do multiplexer é $f_0 = mf_1$. Se todos os canais de entrada sofrerem um aumento de taxa para $R_1 + \delta$, neste caso a taxa de transmissão à saída do multiplexer capaz de acompanhar este aumento será, $R_0 = mR_1(1 + \delta)$. Introduzindo ainda os bits adicionais X temos a expressão (1.3).

Designaremos por A o número de aposições permitidas por cada canal em cada trama. Como o relógio de entrada pode ter uma variação fraccional de $\pm\delta$, a sua frequência pode ter uma variação máxima igual a $\Delta f_1 = 2\delta f_1$ bit/s. Se a frequência de transmissão de tramas for Q tramas/seg teremos que A deverá ser pelo menos:

$$A = \frac{2\delta R_1 \text{ bit / s}}{Q \text{ tramas / s}} = 2\delta \frac{R_1}{Q} \text{ bit / trama}$$

Por outro lado atendendo a que

$$\frac{f_1}{Q} = \frac{I}{m}$$

Temos que:

$$A = 2\delta I / m$$

Tirando o valor de δ desta equação e substituindo na equação temos:

$$f_0 = mf_1 \left(1 + \frac{m}{2I} A \right) \frac{I + X}{I}$$

Exemplo: Para a 2ª hierarquia digital do sistema americano, $m=4$, $f_1=1,544 \text{ Mbit/s}$, $I=48 \times 24$ $X=24$ e deverá ser $0 \leq A \leq I$, donde resulta

$$4 \times 1,544 \times \frac{49}{48} \leq f_0 \leq 4 \times 1,544 \left(1 + \frac{4}{2 \times 48 \times 24} \times 1 \right) \frac{49}{48}$$

$$6,305 \text{ Mbit / s} \leq f_0 \leq 6,316 \text{ Mbit / s}$$

O a 2ª hierarquia possui um relógio de 6.312 Mbit/s, pelo que a condição é satisfeita.

1.3.2 Aquisição e perda de enquadramento de trama

Como já se referiu, o padrão de enquadramento de trama (PET) permite ao desmultiplexador identificar com precisão o início e o fim de uma trama, e deste modo definir com rigor os bits dirigidos a cada canal. A função do enquadramento de trama é também referida com sincronização de trama.

O padrão de enquadramento é constituído por uma sequência binária, que apresenta uma fraca probabilidade de ocorrer durante a trama. A configuração do padrão e o seu comprimento variam em função da hierarquia e da norma utilizada.

A detecção do PET pode ser efectuada comparando a sequência binária recebida com uma cópia do PET armazenado, como se mostra na figura.

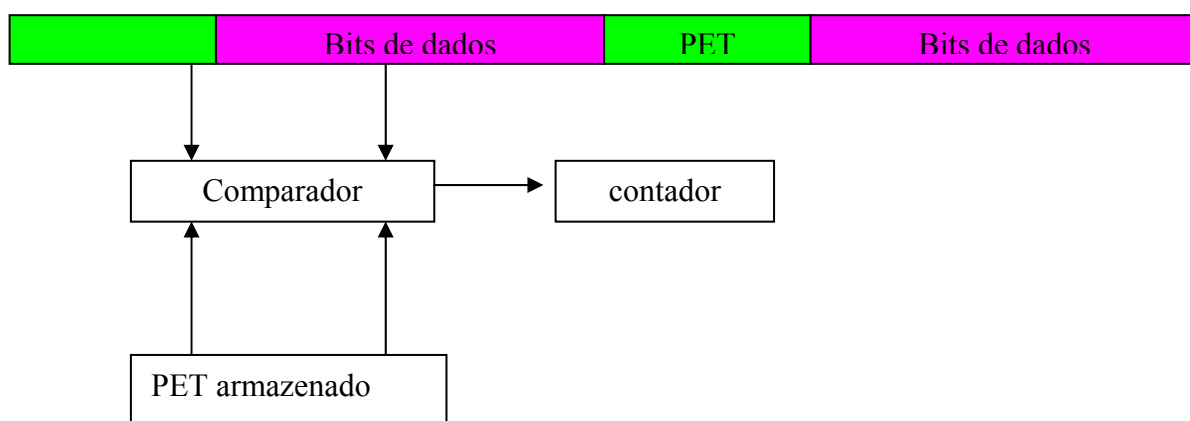


Figura 1-6 Configuração básica de um detector de padrões.

No receptor podemos distinguir as seguintes operações:

Situação de sincronismo- nesta situação o receptor está em sincronismo;

Perda de sincronismo- a perda de sincronismo é declarada quando K tramas sucessivas o PET não é detectado;

Aquisição de sincronismo- quando são feitas M detecções correctas do PET.

Fora de sincronismo – foi detectada perda de sincronismo ou o receptor está a tentar recuperar o sincronismo.

A eficiência de um determinado esquema de sincronização de trama pode ser caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- Tempo médio de aquisição de sincronismo de trama, quando o receptor está fora de sincronismo.
- Tempo necessário para declarar perda de trama quando o receptor está em sincronismo e começa a receber PET errados.

- Tempo médio entre perdas de sincronismo.

Supondo uma trama com L bits dos quais N correspondem ao PET. Considere-se que a probabilidade de detectar um bit erradamente é p . Assume-se que os erros de bit são devidos a ruído encontrado na transmissão, e que estes ocorrem aleatoriamente.

Tempo médio entre perdas de sincronismo

Considera-se também que basta um bit errado na sequência dos N bits da PET para que o PET seja errado

A probabilidade de erro no PET P_p é então:

$$P_p = 1 - \Pr(\text{Padrão recebido sem erros}) \\ = 1 - (1-p)^N$$

Supondo que a perda de trama só é detectada depois de k tramas sucessivas com erro na sequência de trama, a probabilidade de uma declaração de perda de enquadramento, P_E , é:

$$P_E = (P_p)^k = \left(1 - (1-p)^N\right)^k \approx (Np)^k$$

Se são transmitidas F tramas por segundo, então o tempo médio entre perdas de enquadramento é dado por:

$$T_E = \frac{1}{FP_E} = \frac{1}{F(Np)^k}$$

Quando maior for o tamanho da sequência de enquadramento menor será o tempo entre perdas de enquadramento.

Tempo necessário para declarar a perda de enquadramento

Quando o sincronismo é perdido, devido à existência de k PET errados, o sistema pode não detectar esta situação. Isto poderá acontecer se uma sequência de N bits de dados imitar o PET, como os dados são aleatórios a probabilidade desta situação ocorrer é de 2^{-N} . Então a probabilidade de detectar uma perda de trama efectiva numa trama é $1 - 2^{-N}$. Como se exigem k tramas sucessivas com erro na sequência de trama, a probabilidade de detecção de perdas reais de trama, P_d , é:

$$P_d = \left(1 - 2^{-N}\right)^k = 1 - k2^{-N} + \dots$$

Como se pretende $P_d \approx 1$, deverá ser:

$$k2^{-N} \ll 1$$

Se a condição anterior se verificar, ou seja, se a probabilidade de encontrar uma sequência binária que imita o padrão de enquadramento é desprezável, o tempo

necessário para declarar a perda de sincronismo de trama, T_d , é aproximadamente o tempo necessário para transmitir k tramas.

$$T_d = \frac{k}{F(1 - 2^{-N})^k} \approx \frac{k}{F}$$

Tempo médio de aquisição de sincronismo, T_a

Quando a perda de sincronismo é detectada, o sistema inicia uma procura ao longo da trama, N bits de cada vez, até se detectar a PET. Para diminuir a probabilidade de falso sincronismo, resultante do possível aparecimento de uma sequência de dados igual à do enquadramento, resultante do possível aparecimento de uma sequência de dados igual à do enquadramento, apenas se considera que o sincronismo foi adquirido quando se encontra o PET em M tramas consecutivas. O pior caso no que respeita ao tempo de aquisição de trama corresponde à situação em que se inicia a pesquisa do PET no bit consecutivo ao verdadeiro PET. Para agravar a situação poderá haver falsas detecções da sequência de trama devido à probabilidade 2^{-N} de N bits de dados imitarem a sequência correcta do PET. Quando isto ocorre, a procura é suspensa até à trama seguinte. Então se houver h paragens de procura, o tempo de aquisição médio será:

$$T_a = \frac{M + h + 1}{F}$$

Para determinar h note-se que o pior caso é quando se examinam $L+h$ sequências de N bits, das quais h foram detectadas falsamente como sequências de trama. Então $h/(L+h)$ é a probabilidade de detecção falsa que como se viu anteriormente é dada por 2^{-N} .

Logo

$$2^{-N} = \frac{h}{L + h} \rightarrow h = \frac{L}{2^N - 1}$$

Finalmente temos que o tempo médio total (pior caso) para a detecção de perda e aquisição de enquadramento será dado por

$$T_t = T_d + T_a = \frac{k + M + 1 + \frac{L}{2^N - 1}}{F}$$

Exemplo 1-1 Considere um sistema PCM-TDM de 2 Mbit/s caracterizado pelos seguintes parâmetros:

$L=1000$ bits

$k=3$

$M=2$

$N=8$ bits

$p=10^{-5}$

$F= 2$ K tramas/s, taxa de transmissão de trama

Cálculo do tempo de aquisição de trama, T_a :

$$T_a = \frac{3 + 2 + 1 + \frac{1000}{2^8 - 1}}{2 \times 10^3} = 0.005 \text{ s}$$

Cálculo do tempo médio entre perdas de sincronismo

$$T_E = \frac{1}{2 \times 10^3 (8 \times 10^{-5})^3} = 10^9 = 32 \text{ anos}$$