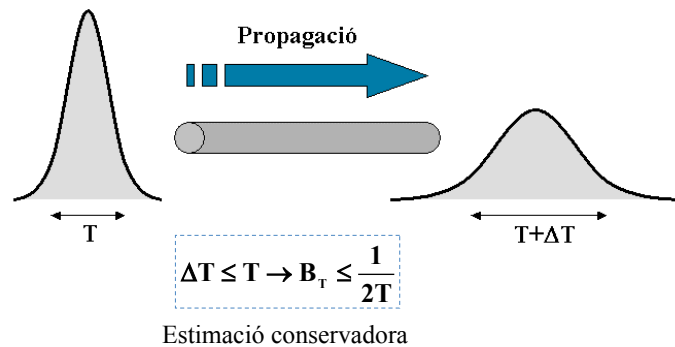


# DISPERSIÓ EN F.O.

## Definició

“Quan un pols curt de llum es propaga a través d’una fibra òptica, la seva energia tendeix a separar-se en el temps donant lloc a un eixamplament del mateix envers un interval temporal major”



## Dispersió intermodal

Cada mode es propaga a una velocitat diferent donant lloc a un retard d’uns respecte els altres. Només es dona en fibres multimode.

## Dispersió intramodal

### Dispersió cromàtica (GVD)

La velocitat de propagació depèn de la longitud d’ona, cada component espectral experimenta un retard diferent. És negligible enfront la dispersió intermodal.

### Dispersió del material

La dependència freqüencial de l’índex de refracció dona lloc a diferents velocitats de propagació.

### Dispersió guia-ona

La distribució espacial de la llum depèn de la longitud d’ona i en conseqüència la velocitat de propagació. És negligible enfront la dispersió del material.

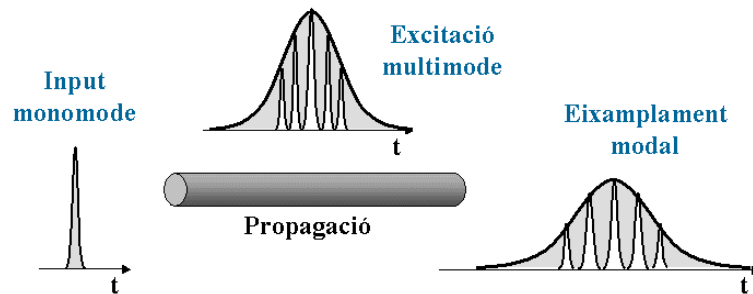
### Dispersió de polarització (PMD)

L’índex de refracció depèn de l’angle  $\phi$ , per tant cada eix de l’estat de polarització es propaga a una velocitat diferent. És negligible enfront la dispersió cromàtica.

# DISPERSIÓ EN FIBRES MULTIMODE

## Dispersió intermodal

La dispersió modal es dona en fibres multimode com a resultat de les diferents velocitats de grup corresponents a cada mode de propagació. Els modes no són excitats per igual donant lloc a un perfil determinat.



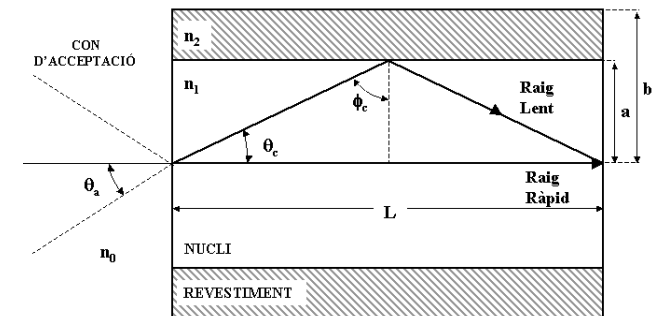
## Diferència de camins

$$t_{\min} = \frac{L}{c} \quad t_{\max} = \frac{L}{c \sin \phi_c}$$

$$n_{\text{eff}} = n_1 \cdot \sin \phi$$

$$\tau_{\text{inter}} \equiv \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} =$$

$$= \frac{n_1}{c} \frac{n_1 - n_2}{n_2} \approx \frac{n_1}{c} \Delta \approx \frac{1}{2n_1 c} NA^2 \quad \text{Unitats: [ns/km]}$$



Fibres SI

$$\tau_{\text{inter}} \approx \frac{n_1 \Delta}{c}$$

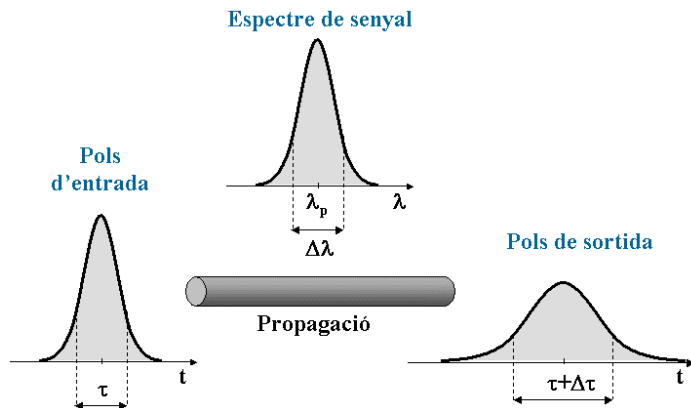
Fibres GRIN

$$\tau_{\text{inter}} \approx \frac{n_1 \Delta^2}{8c}$$

# DISPERSIÓ EN FIBRES MONOMODE

## Dispersió cromàtica (GVD)

L'origen d'aquest tipus de fenomen prové de la dependència freqüencial de l'índex de refracció  $n$ , per tant, de la velocitat de grup.



Retard de grup [s/m]

$$\tau_g \equiv \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{\partial n}{\partial \omega} = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = \frac{n}{c} - \frac{\lambda}{c} \frac{\partial n}{\partial \lambda}$$

$$\beta \equiv n \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi n}{\lambda} \rightarrow \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = -\frac{2\pi n}{\lambda^2} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial n}{\partial \lambda}, \quad \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = -\frac{2\pi c}{\omega^2} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c}$$

$\beta$ : constant de propagació

Velocitat de grup [m/s]

$$v_g \equiv \frac{1}{\tau_g} = \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right)^{-1} = \frac{c}{n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}} = \frac{c}{n - \lambda \frac{\partial n}{\partial \lambda}} = \frac{c}{n_g}$$

Índex de grup

$$n_g \equiv n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}$$

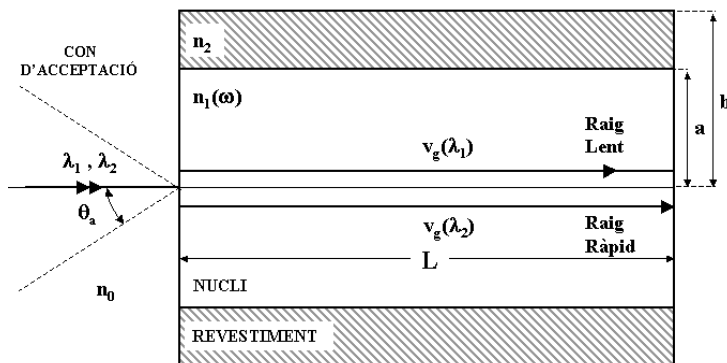
Velocitat de fase

$$v_f \equiv \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{n} \xrightarrow{\frac{\partial n}{\partial \omega} = 0} v_f = v_g$$

$$n \rightarrow \bar{n}$$

# DISPERSIÓ DEL MATERIAL

Cada component freqüencial experimenta un retard diferent degut a que es propaguen a diferents velocitats de grup.



# DISPERSIÓ DEL MATERIAL

Eixamplament

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \omega} \Delta \omega = \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{L}{v_g} \right) \Delta \omega = L \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \Delta \omega = L \beta_2 \Delta \omega$$

$$\beta_2 \equiv \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \quad \text{Coeficient de dispersió}$$

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{L}{v_g} \right) \Delta \lambda = L D_M \Delta \lambda$$

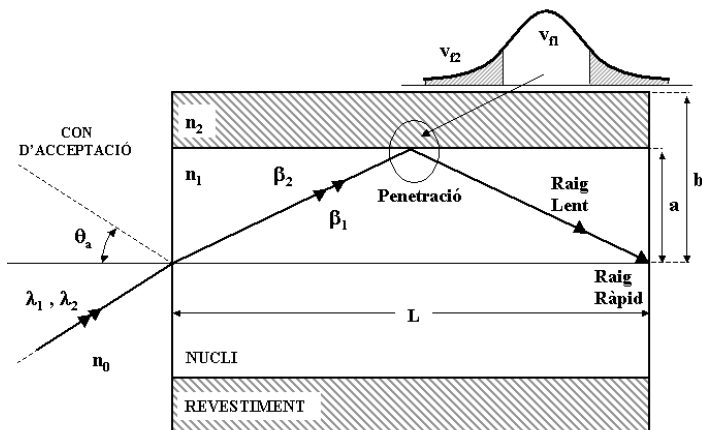
$$D_M \equiv \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{1}{v_g} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$$

Paràmetre de dispersió

Unitats: [ps/(nm·km)]

### DISPERSIÓ GUIA-ONA

La velocitat de grup dels modes depèn de la longitud d'ona, encara que la dispersió del material sigui negligible, donat que d'ella en depèn el percentatge de penetració en el revestiment.



2. FIBRA ÒPTICA - DISPERSIÓ EN F.O.

### DISPERSIÓ DEL MATERIAL I GUIA-ONA COMBINADES

$$D_{\text{intra}} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left( 2 \frac{\partial \bar{n}}{\partial \omega} + \omega \frac{\partial^2 \bar{n}}{\partial \omega^2} \right) = D_M + D_W$$

$$b \equiv \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}$$

$$\bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$$

$$|D_{\text{intra}}| \cdot \Delta\lambda \equiv \tau_{\text{intra}} \geq 0 \quad [\text{s/m}]$$

$$D_W = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[ \frac{n_{2g}^2}{n_2\omega} V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2} + \frac{\partial n_{2g}}{\partial \omega} \frac{\partial(Vb)}{\partial V} \right]$$

$$D_M = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{\partial n_{2g}}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \frac{\partial n_{2g}}{\partial \lambda}$$

empíricament

$$D_W \approx -\frac{n_{1g} - n_{2g}}{c\lambda} \frac{1.984}{V^2}$$

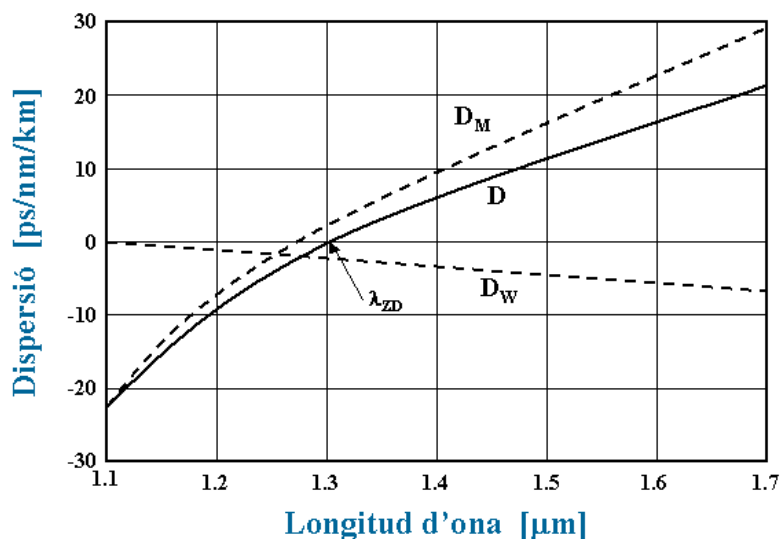
$n_{2g}$ : índex de grup del revestiment

b: constant propagació normalitzada

$\Delta$ : Índex de refracció relatiu  
V: Freqüència normalitzada

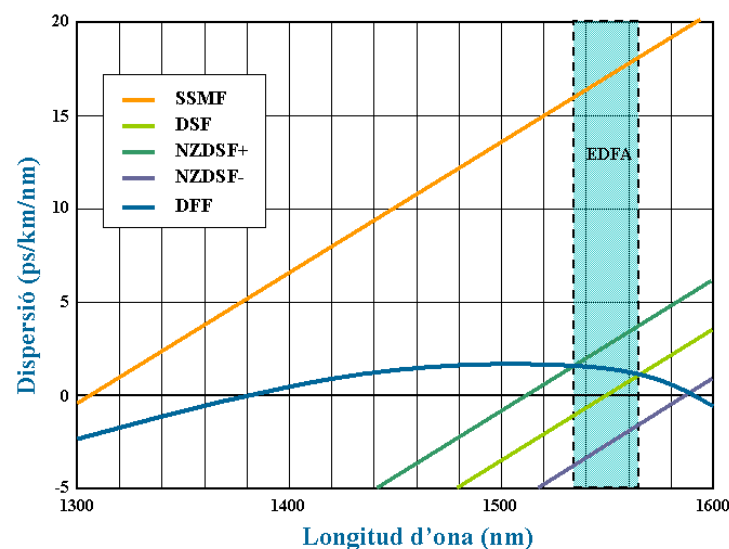
2. FIBRA ÒPTICA - DISPERSIÓ EN F.O.

### DISPERSIÓ DEL MATERIAL I GUIA-ONA COMBINADES



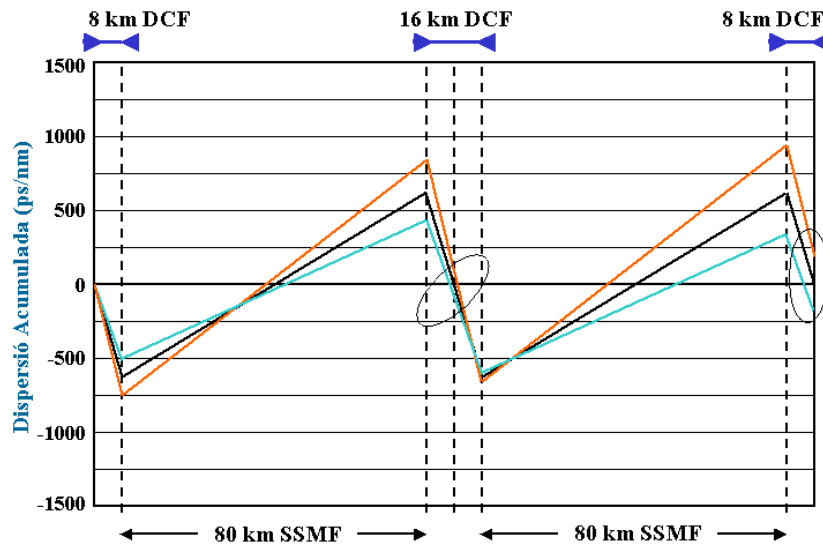
2. FIBRA ÒPTICA - DISPERSIÓ EN F.O.

### Característiques de dispersió de diferents fibres comercials



2. FIBRA ÒPTICA - DISPERSIÓ EN F.O.

### Compensació de dispersió amb fibres DCF (mapes de dispersió)



### Compromís entre atenuació i dispersió

#### Transmissor

$P_0$  [dBm]: Potència transmesa  
 $\lambda$  [nm]: Longitud d'ona nominal  
 $\Delta\lambda$  [nm]: Amplada espectral  
 $R_B$  [b/s]: Velocitat de bit

#### Receptor

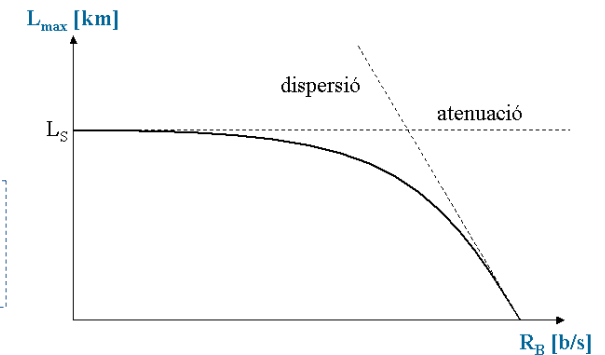
$S_R$  [dBm]: Sensibilitat  
 BER=10<sup>-9</sup>

#### Fibra

$\alpha$  [dB/km]: Atenuació  
 $D$  [ps/nm·km]: Dispersió

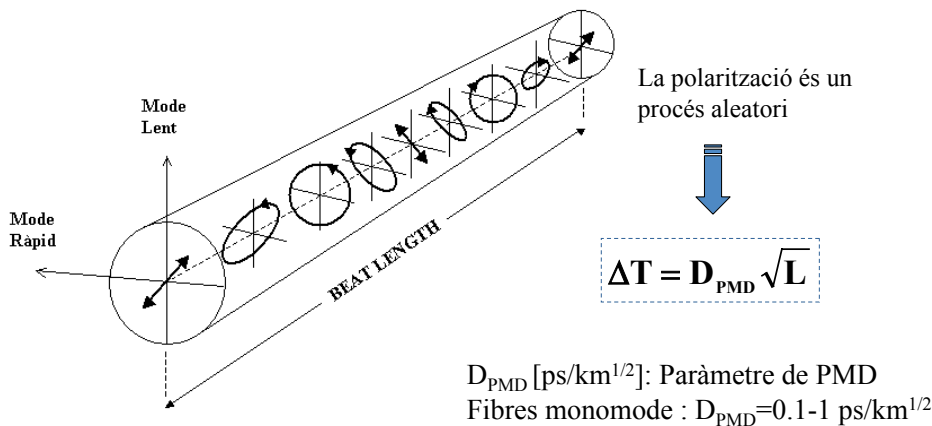
$$P_0 - \alpha L_S = S_R$$

$$\Delta T = |D| \cdot \Delta\lambda \cdot L \leq T_B = \frac{1}{R_B}$$



### Dispersió de polarització (PMD)

L'origen d'aquest tipus de fenomen prové de la dependència de l'índex de refracció i, per tant, de la velocitat de grup, en quant a la polarització.



### AMPLE DE BANDA

#### Definició

“L'ample de banda d'una fibra es defineix a partir de la seva resposta impulsional i és inversament proporcional a la dispersió”

$$B \propto \frac{1}{\tau}$$

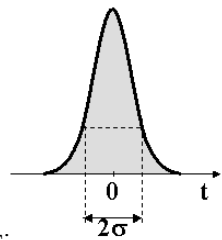
Fibres multimode  $\rightarrow \tau_T = [\tau_{inter}^2 + \tau_{intra}^2]^{1/2} \approx \tau_{inter}$

Fibres monomode  $\rightarrow \tau_T = \tau_{intra}$

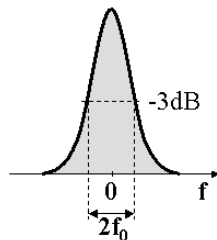
$\tau_{intra}$  i  $\tau_{inter}$  són v.a. Independents de mitja zero

# COMPORTAMENT GAUSSIÀ

Resp. Impulsional



Func. Transferència



σ: Desviació Tipus

f<sub>0</sub>: AB -3dB

Domini Temporal

Domini Freqüencial

Funció Gaussiana  $\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2\right]$   
τ = 2σ

Funció Gaussiana  $\exp\left[-\ln 2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]$   
f<sub>0</sub>: ample de banda per m

# Ample de banda

$$h(t) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2\right] \xrightarrow{F} H(f) = \sigma\sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f}{\frac{1}{2\pi\sigma}}\right)^2\right]$$

$$H_{-3dB}(f_0) = \frac{1}{2} H(0) \rightarrow f_0 = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sigma} \approx \frac{0.1874}{\sigma} \text{ [m/s]} \rightarrow \boxed{B = \frac{f_0}{L}} \text{ [1/s]}$$

$$f_0\sigma = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi^2}} \approx 0.1874$$

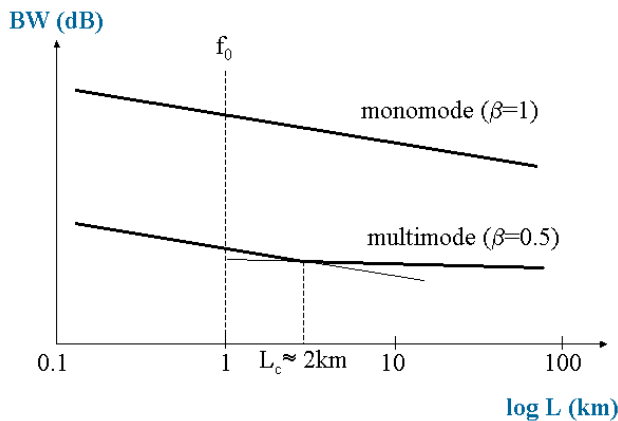
f<sub>0</sub> [Hz·m]: Ample de banda per m  
σ [s/m]: Desviació tipus de dispersió

$$f_0\sigma = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi^2}} 10^3 \approx 187.4$$

f<sub>0</sub> [GHz·km]: Ample de banda per km  
σ [ps/km]: Desviació tipus de dispersió

# Ample de banda pràctic

“L’ample de banda pràctic d’una fibra es defineix a partir de la correcció del seu ample de banda teòric fent ús del paràmetre β”



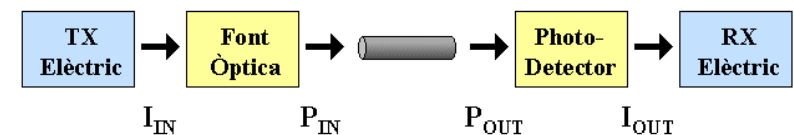
$$\boxed{B = \frac{f_0}{L^\beta}}$$

$$0.5 < \beta < 1$$

$$\beta = 0.5$$

Fibres multimode amb font LED i L > L<sub>c</sub>

# AMPLE DE BANDA ELÈCTRIC vs ÒPTIC

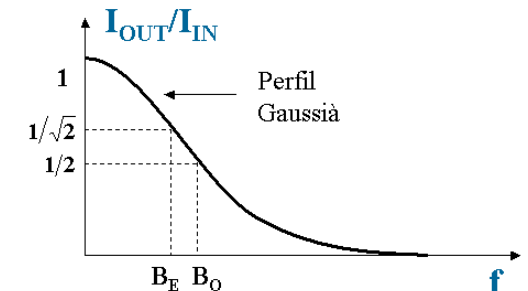


$$|H_E|^2 \equiv \frac{P_{E-IN}}{P_{E-OUT}} = \frac{I_{OUT}^2}{I_{IN}^2}$$

$$B_E \equiv f \Big|_{|H_E|^2 = \frac{1}{2}} \rightarrow \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$|H_O|^2 \equiv \frac{P_{O-IN}}{P_{O-OUT}} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}}$$

$$B_O \equiv f \Big|_{|H_O|^2 = \frac{1}{2}} \rightarrow \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1}{2}$$



$$\boxed{B_O > B_E}$$

$$|H|^2 = \exp[-\alpha f^2]$$

$$B_o \rightarrow \exp[-\alpha B_o^2] = \frac{1}{2} \rightarrow \alpha_o = \frac{\ln 2}{B_o^2}$$

$$B_e \rightarrow \exp[-\alpha B_e^2] = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \alpha_e = \frac{\ln 2}{2B_e^2}$$

$$|H|^2 = \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{f}{B_o}\right)^2\right] = \exp\left[-\frac{\ln 2}{2} \left(\frac{f}{B_e}\right)^2\right]$$



$$B_o = \sqrt{2} B_e$$

### Relació $R_B - B_E$

“El que limita la velocitat de transmissió és l’ample de banda elèctric”

$$\sigma f_o = 0.1874$$

$$f_e = \frac{f_o}{\sqrt{2}} \rightarrow \sigma f_e = 0.1325$$

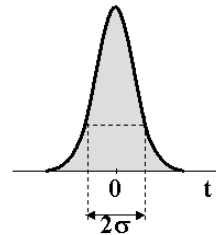
$$2\sigma = \tau$$



$$R_B \leq 2B_E$$

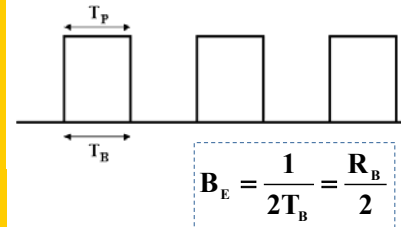
Nyquist

Resp. Impulsional

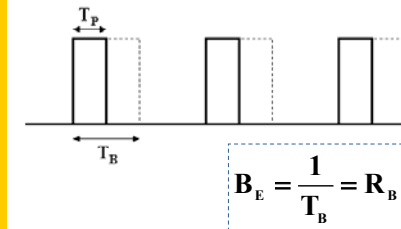


### Relació $T_B - B_E$

#### Modulació NRZ



#### Modulació RZ



### Espectres de senyal

