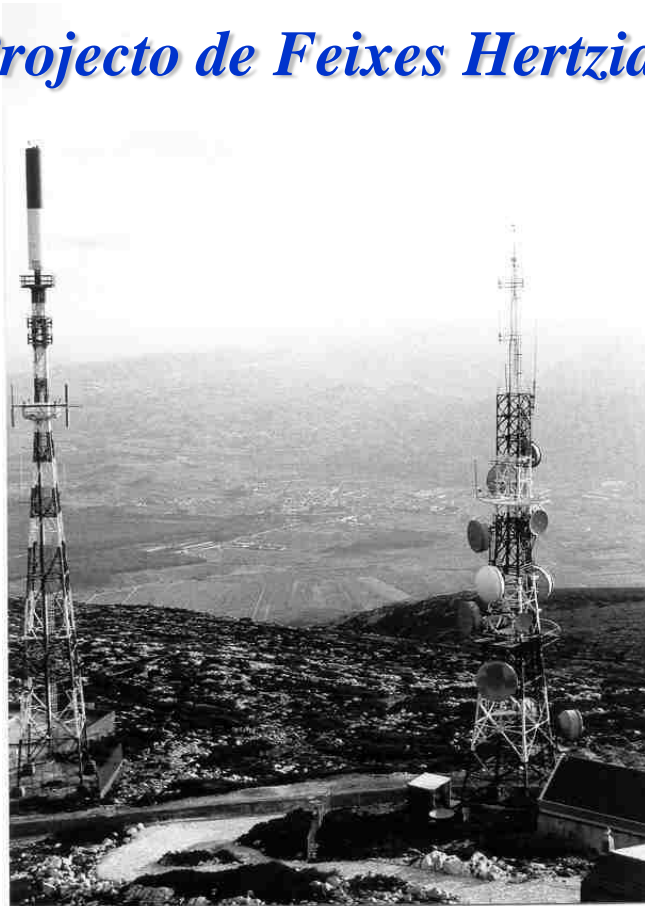


Projecto de Feixes Hertzianos



Paula Queluz, António Rodrigues

Projecto de uma ligação digital em Feixes Hertzianos

Dados do Problema

- Localização dos pontos terminais da ligação
- Número de canais telefónicos/vídeo a disponibilizar
- Lei de variação, com f , da potência de emissão e do factor de ruído do receptor
- Banda de frequências e largura de banda disponíveis para os canais/serviço pretendidos (consultar página da ANACOM)

Objectivos do Projecto

- Respeito das **normas de qualidade** – taxas de erro – reconhecidas internacionalmente (ITU-R), **minimizando o custo do projecto.**
 - Respeito das **normas de fiabilidade** – % de tempo em que a ligação está disponível – reconhecidas internacionalmente (ITU-R), **minimizando o custo do projecto.**
-

- Segundo os dados do projecto, **minimizar o custo** do projecto é minimizar o **preço de uma chamada telefónica (bidireccional) de 3 minutos**, admitindo:
 - encargos de exploração anuais, iguais a 0.15 do custo inicial do projecto;
 - encargos nulos com terrenos e direitos de passagem;
 - taxa de utilização anual da banda de acordo com o definido pela ANACOM;
 - duração do projecto de 25 anos;
 - valor residual nulo;
 - tráfego médio por canal telefónico igual a $(0.2 + 0.02 * t)$ Erlang, no ano t ;
 - taxa de inflação de 3%;
 - taxa interna de retorno (a preços constantes) de 10%.

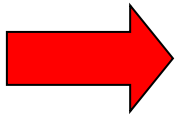
Custo de uma chamada de 3 minutos, C_3

$$C_3(t) = \frac{d_0 / \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1+i)^t \times (1+tir)^t} + 0.15 \times d_0 + T_{LB/ano}}{n \times T_{tel} \times N}$$

- $C_3(t)$ é o custo de uma chamada de 3 minutos no ano t
- d_0 é o custo inicial do projecto (ver páginas 30 e 31)
- n é o número de canais telefónicos (120)
- T_{tel} é o tráfego médio por canal telefónico no ano t (o inicial é $t=1$)
$$T_{tel} = (0.2 + 0.02 \times t) \text{ Erlang}$$
- N é o número máximo de chamadas (de 3 minutos) num ano ($N=365,4 \times 24 \times 60 / 3$)
- i é a taxa de inflacção (3%)
- tir é a taxa interna de retorno (10%)
- $T_{LB/ano}$ é a taxa anual de utilização da banda (ver no site da ANACOM)

$$C_3(t) = \frac{d_0 / \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1+i)^t \times (1+tir)^t} + 0.15 \times d_0 + T_{LB/ano}}{n \times T_{tel} \times N}$$

- De notar que como o tráfego telefónico (T_{tel}) cresce ao longo dos anos, o custo de uma chamada telefónica baixará.



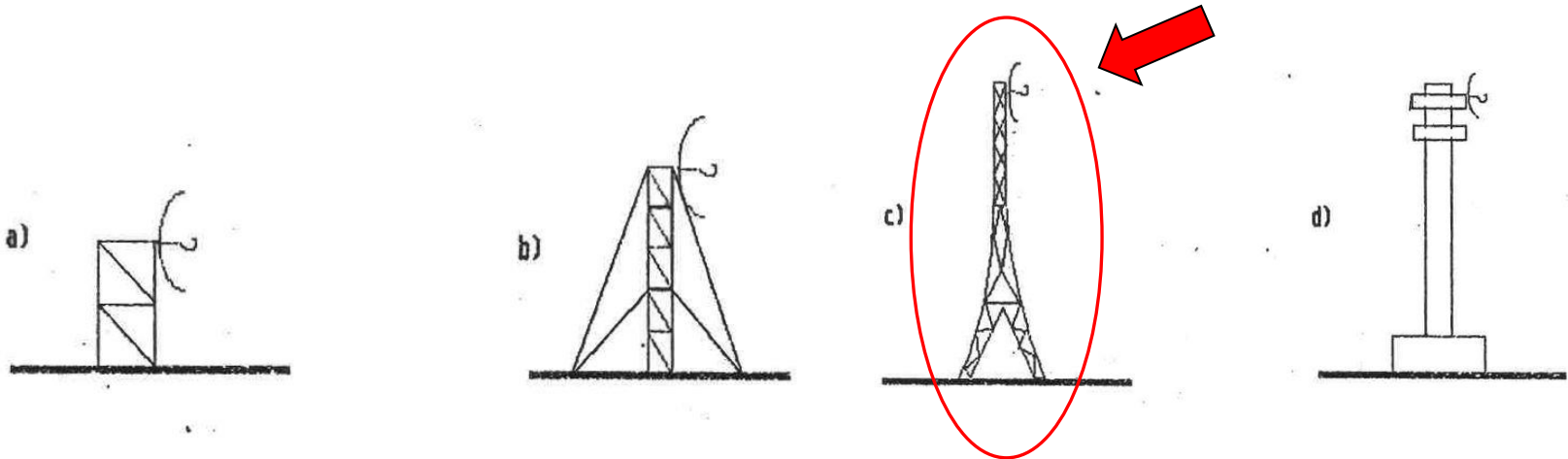
Representar, graficamente, a evolução do custo de uma chamada telefónica de 3 minutos, ao longo de 25 anos (i.e., $t = 1 \dots 25$).

Elementos a especificar

- Banda de frequências e LB do canal a usar (dentro dos disponíveis)
- Diâmetro, localização e orientação das antenas (terminais e repetidores)
 - Orientação: ângulos de fogo e azimuth
 - Localização: latitude e longitude (obtem-se com o Google Earth)
- Tipo de repetidores (passivos ou activos; mas sempre costas-com-costas)
- Altura dos mastros (admitir torres auto-suportadas)
- Potência do(s) emissor(es) e factor de ruído do(s) receptor(es)
- Tipo de modulação (2-, 4-, 8-PSK, 16-, 64-, 256-QAM)
- Tipo e comprimento de guias
- Uso e tipo de diversidade e/ou ~~igualação~~
 - Considerar assinatura de 0.1 MHz na janela 3.9 do Feixer (método 2)

Estruturas de suporte das antenas

- **Torres de Emissão/Recepção** – consoante a importância da estação, a frequência da ligação e a altura das antenas acima do solo, as torres podem ser:
 - a) estruturas metálicas, muito simples, autosuportadas, para alturas até ≈ 6 m
 - b) estruturas metálicas, simples, espiadas, para alturas até ≈ 100 m
 - c) estruturas metálicas, mais complexas, autosuportadas, para alturas até ≈ 100 m
 - d) estruturas complexas (metálicas ou de betão) para alturas entre 30 e 300 m



Nota: O preço da torre aumenta com a altura (ver pág. 31) e “dispara” acima de 30 m. A altura do mastro deve ser a mínima possível que garanta a desobstrução do 1º elipsóide de Fresnel, não devendo no entanto ser inferior a 6 m.

Elementos a especificar

- Banda de frequências e LB do canal a usar (dentro dos disponíveis)
- Diâmetro, localização e orientação das antenas (terminais e repetidores)
 - Orientação: ângulos de fogo e azimuth
 - Localização: latitude e longitude (obtem-se com o Google Earth)
- Tipo de repetidores (passivos ou activos; mas sempre costas-com-costas)
- Altura dos mastros (admitir torres auto-suportadas)
- Potência do(s) emissor(es) e factor de ruído do(s) receptor(es)
- Tipo de modulação (2-, 4-, 8-PSK, 16-, 64-, 256-QAM)
- Tipo e comprimento de guias
- Uso e tipo de diversidade e/ou ~~igualação~~
 - Considerar assinatura de 0.1 MHz na janela 3.9 do Feixer (método 2)

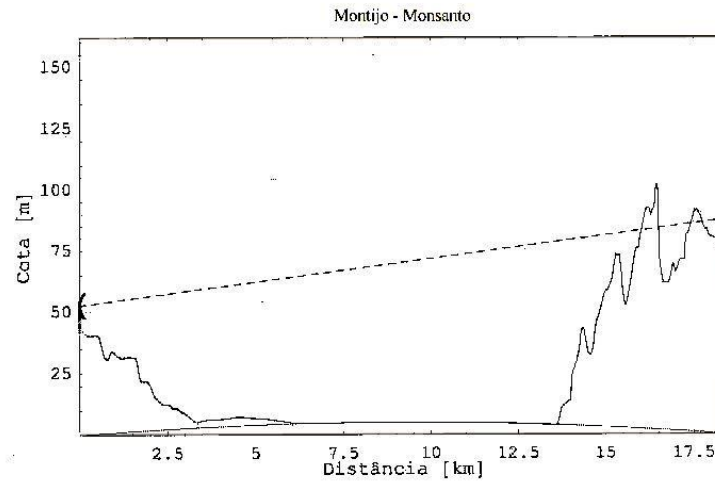
Com recurso ao *Google Earth*:



- Estações terminais em pontos altos de modo a obter, se possível, linha de vista
- Estações repetidoras (passivas ou activas) em linha de vista, com saltos tão longos quanto possível, de modo a minimizar o número de estações repetidoras
- Estações terminais localizadas de modo a evitar a influência das reflexões
- Estações terminais tão próximas quanto possível das origens e destinos do tráfego (ligação por cabo coaxial ou fibra óptica)
- Estações terminais com fácil acesso e fornecimento fiável de energia
- Estações terminais e repetidores com baixo impacto ambiental

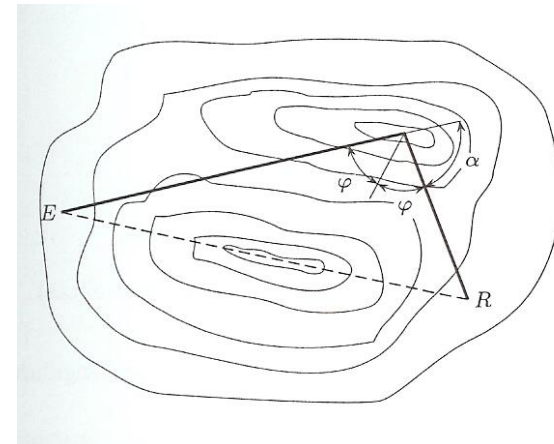
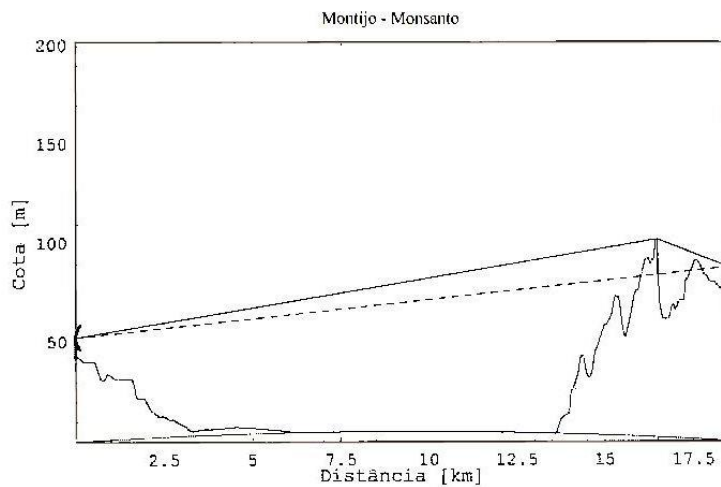
Perfil da ligação

- Percurso directo



Nota: escalas vertical e horizontal muito diferentes

- Percurso alternativo



Repetidores passivos

- Existem 3 tipos de repetidores passivos:

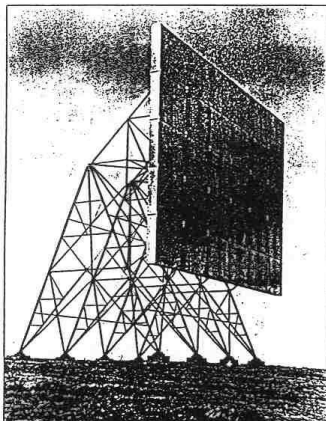
a) **Espelho plano** com ganho

$$G_{esp} = 2 \times 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} a_{esp} \cos \phi \right) + 10 \log_{10} \eta \text{ (dB)}$$

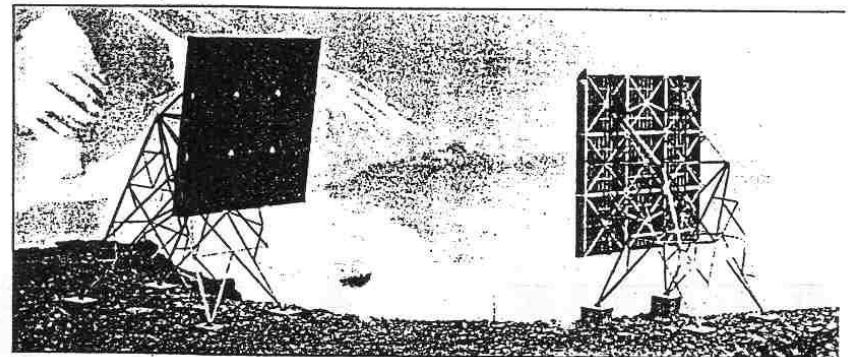
onde a_{esp} é a área física do espelho, ϕ é o ângulo de incidência no espelho e η é o rendimento (≈ 1)

b) **Periscópio** – conjunto de 2 espelhos planos com ganho correspondente ao menor ganho dos dois espelhos

c) **Costas-com-costas** - 2 antenas parabólicas ligadas através de um pequeno troço de guia ou cabo coaxial com ganho igual à soma dos ganhos das antenas



a)



b)

Repetidores passivos (cont.)

- No “Feixer” o repetidor passivo é caracterizado pela **área efectiva** (a_{ef}).
- Se o repetidor passivo for do tipo “costas-com-costas” a relação entre a área eficaz e o diâmetro D das antenas é:

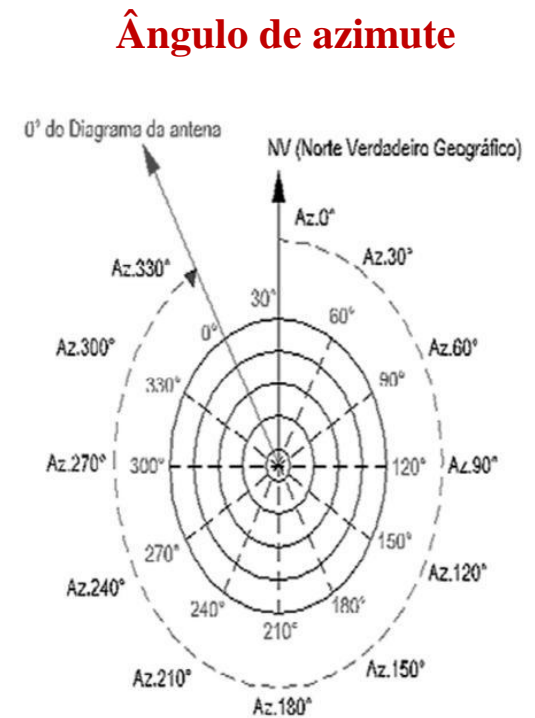
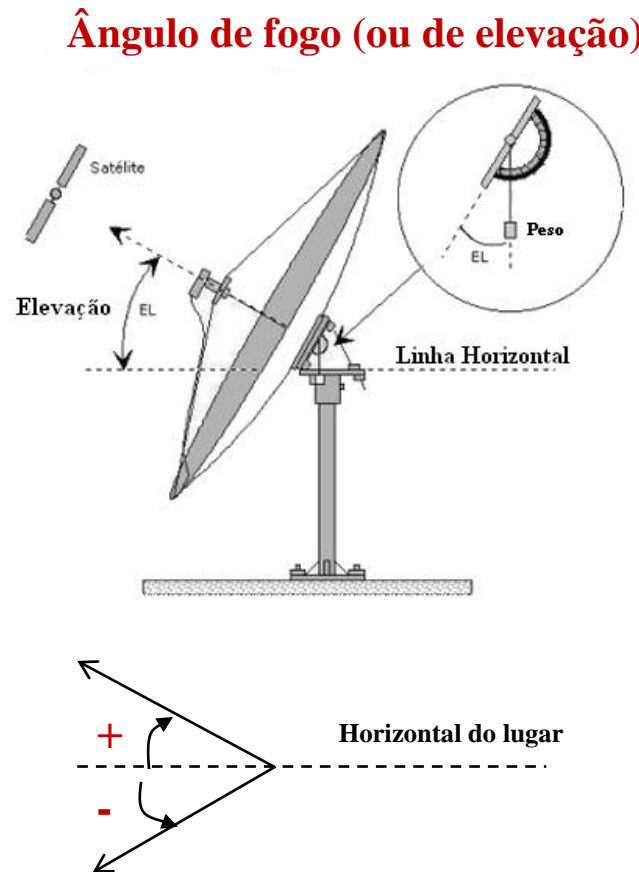
$$a_{ef} = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \eta_a$$

onde η_a é o **rendimento de abertura** da antena (valor típico: 0.5), vindo

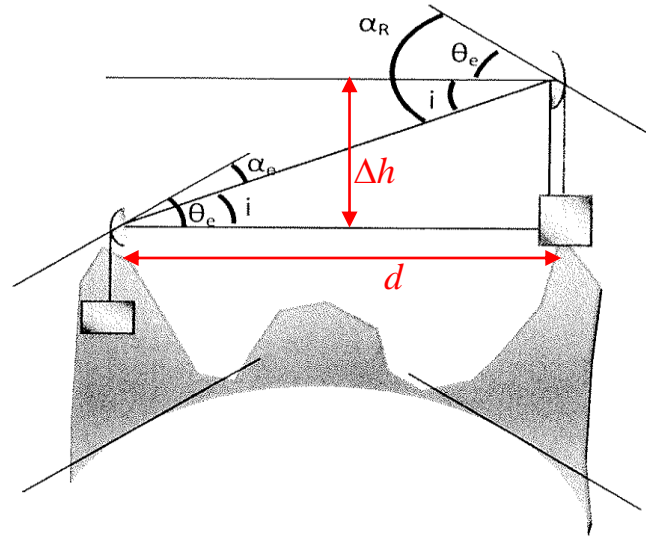
$$D = 2 \times \sqrt{\frac{a_{ef}}{\pi \eta_a}} \quad [\text{m}]$$

Nota 1: D máximo no projecto é 4,5... m (15 pés)

Nota 2: O rendimento que é referido na etapa 1.10.1 do Feixer não é o rendimento de abertura, mas sim o rendimento devido a perdas na antena – podem usar o valor 1.



Ângulo de fogo



Considere-se para ponto R, o ponto com cota mais elevada.

- Ângulos de fogo: $-\alpha_E$ e $-\alpha_R$, com $\alpha_E = \theta_E - i$ e $\alpha_R = \theta_E + i$
- $i = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta h}{d}\right)$ e $\theta_E = \tan^{-1}\left(\frac{d/2}{r_e}\right)$
- r_e - raio equivalente da Terra

Ângulo de fogo (exemplo de cálculo)

Sintra: cota de 69 m (incluindo mastro da antena)

Almada: cota de 212 m (incluindo mastro da antena)

$d = 23.7$ km



$$i = 0.3457^\circ$$

$$\theta_E = 0.07994^\circ$$

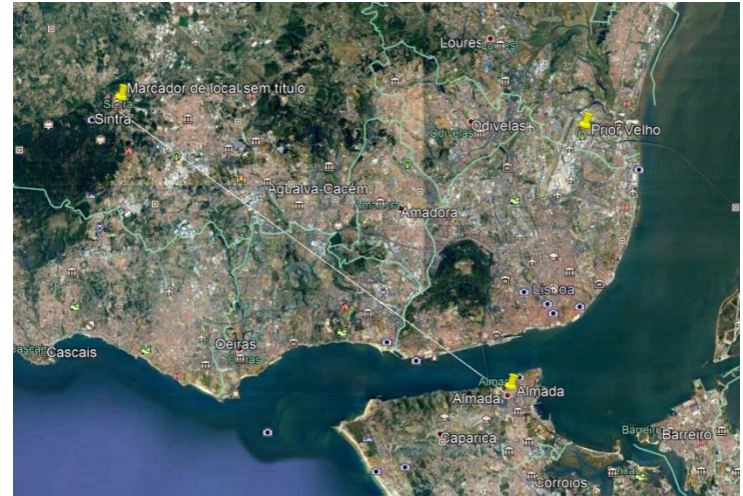
$$\alpha_E = \theta_E - i = -0.26576^\circ$$

$$\alpha_R = \theta_E + i = 0.42564^\circ$$



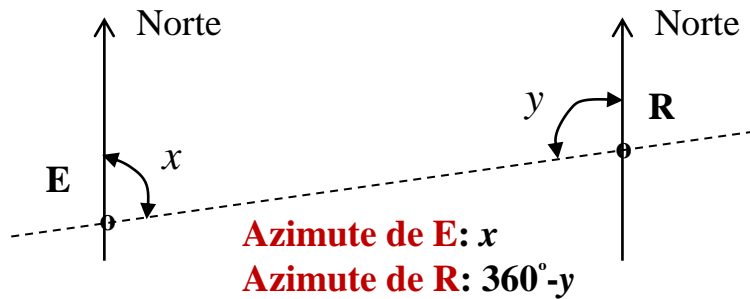
Ângulo de fogo em Sintra (**E**): $-\alpha_E = 0.26576^\circ$

Ângulo de fogo em Almada (**R**): $-\alpha_R = -0.42564^\circ$

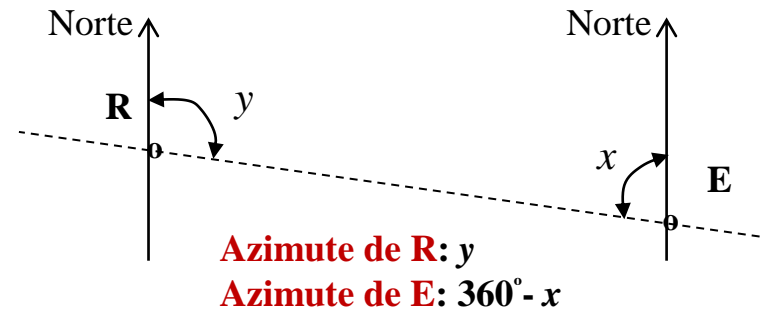


Azimute

- Sejam t_E , g_E e t_R , g_R respectivamente a latitude e longitude dos terminais do percurso (estes valores podem ser obtidos através do *Google Earth*). As longitudes são tomadas como positivas para leste do meridiano de Greenwich e negativas para oeste. **Considere-se para ponto R o ponto de latitude mais elevada.**



OU



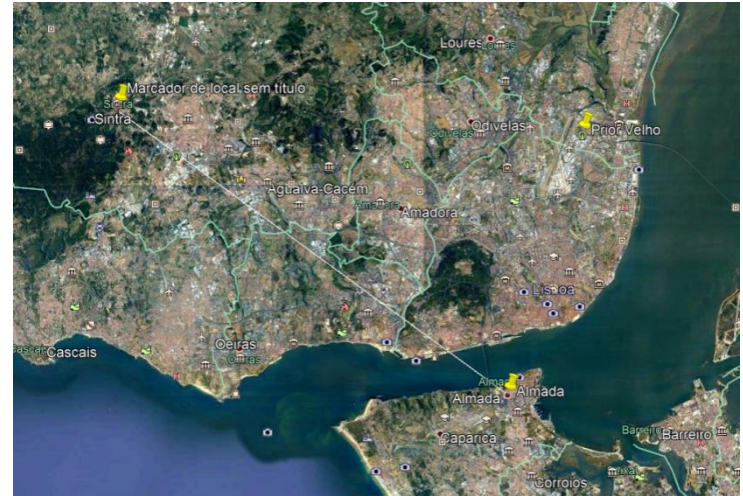
$$y = \arctan\left(\cot\left(\frac{|g_R - g_E|}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{t_R - t_E}{2}\right)}{\cos\left(\frac{t_R + t_E}{2}\right)}\right) + \arctan\left(\cot\left(\frac{|g_R - g_E|}{2}\right) \frac{\cos\left(\frac{t_R - t_E}{2}\right)}{\sin\left(\frac{t_R + t_E}{2}\right)}\right)$$

$$x = \arctan\left(\cot\left(\frac{|g_R - g_E|}{2}\right) \frac{\cos\left(\frac{t_R - t_E}{2}\right)}{\sin\left(\frac{t_R + t_E}{2}\right)}\right) - \arctan\left(\cot\left(\frac{|g_R - g_E|}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{t_R - t_E}{2}\right)}{\cos\left(\frac{t_R + t_E}{2}\right)}\right)$$

Azimute (exemplo de cálculo)

Sintra: latitude = 38 (graus) 48 (minutos) 7.15 (segundos) N
 $t_R = 38.8020$ graus
 longitude = 9 (graus) 22 (minutos) 54.37 (segundos) W
 $g_R = -9.3818$ graus

Almada: latitude = 38 (graus) 40 (minutos) 35.5 (segundos) N
 $t_E = 38.6766$ graus
 longitude = 9 (graus) 9 (minutos) 54.36 (segundos) W
 $g_E = -9.1651$ graus



$$x = 53.3441^\circ$$

$$y = 126.5204^\circ$$



Azimute da antena em Sintra (**R**): $y = 126.5204^\circ$

Azimute da antena em Almada (**E**): $360^\circ - x = 306,6559^\circ$

Após consultar, no site da ANACOM, as bandas de frequência disponíveis e a LB dos canais radioelétricos (“separação entre canais”), e considerando que:

$$LB = \frac{f_b}{\log_2 M} (1 + \alpha)$$

obtém-se M , o tipo de modulação e o valor de α

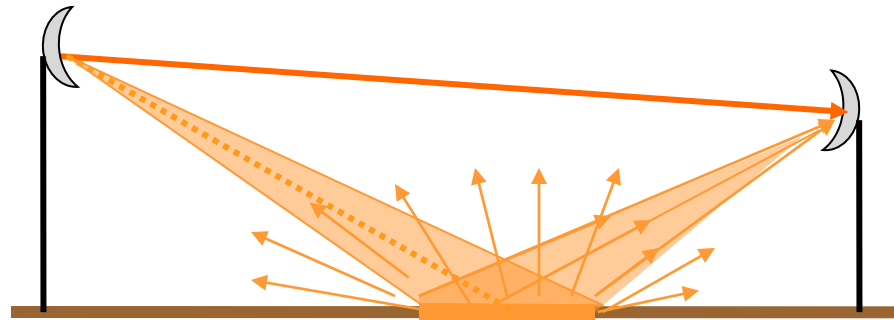
- 2-, 4-, 8-PSK, 16-, 64-, 256-QAM
- $\alpha \in [0.1, 0.5]$

Factores que condicionam a potência recebida em condições **reais** de propagação

- Atenuação provocada pelos guias de emissão e recepção
 - Atenuação provocada pelos obstáculos
 - Reflexões no terreno
 - Efeito da curvatura da Terra
- Atenuação devida aos gases atmosféricos
 - Efeitos refractivos da atmosfera
 - Atenuação devida à chuva
- Desvanecimento (*fading*) multipercurso

- A Terra não é um reflector perfeito, apresentando alguma rugosidade. Em consequência, existe uma área em torno do ponto especular (e cuja dimensão depende das características do terreno, como a **rugosidade**) a contribuir com potência dispersa na direcção da antena receptora.

□ Área activa de dispersão



- Em termos de projecto, é usual exigir que:

$$P_S < P_D - 10 \text{ dB}$$

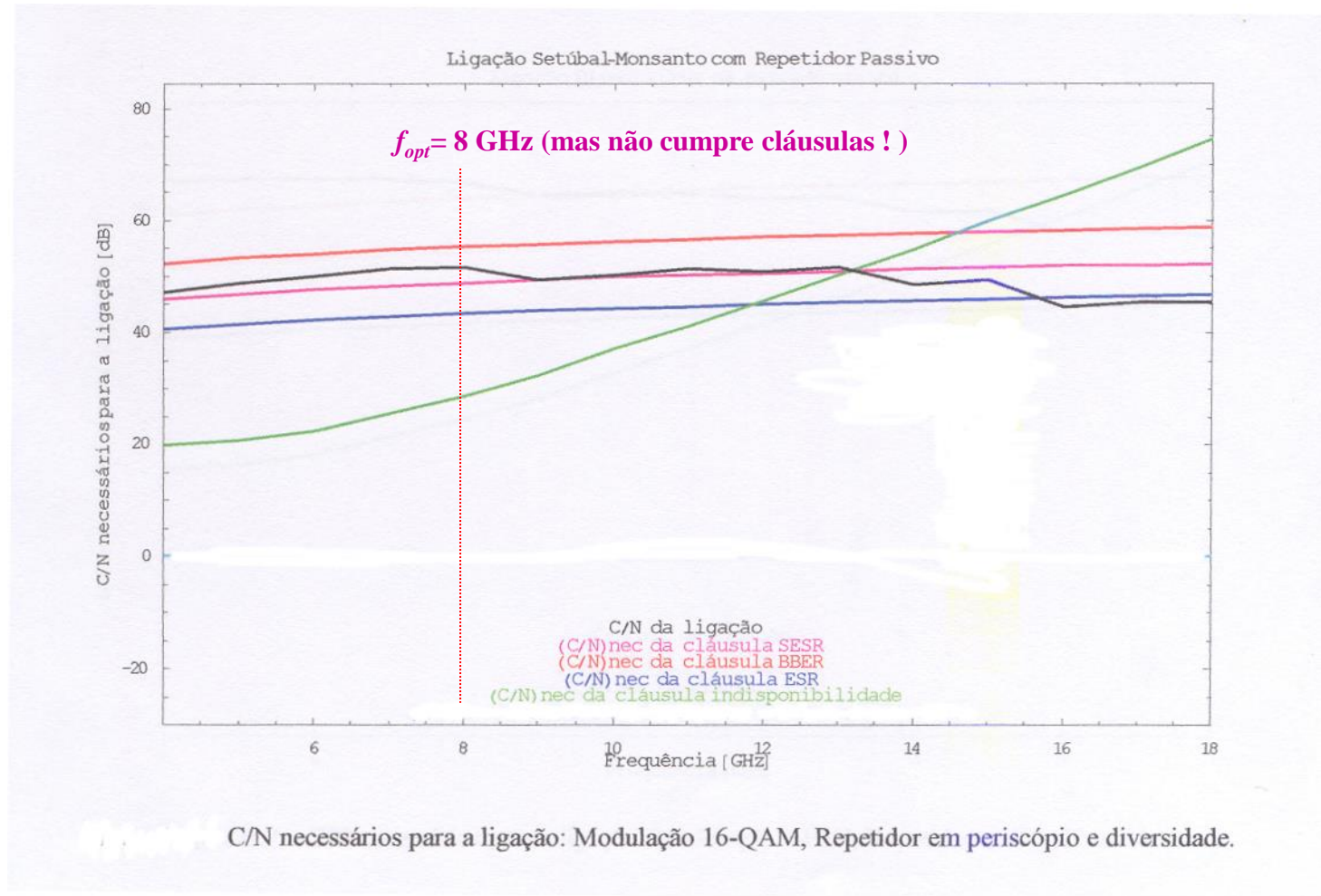
potência dispersa

potência directa

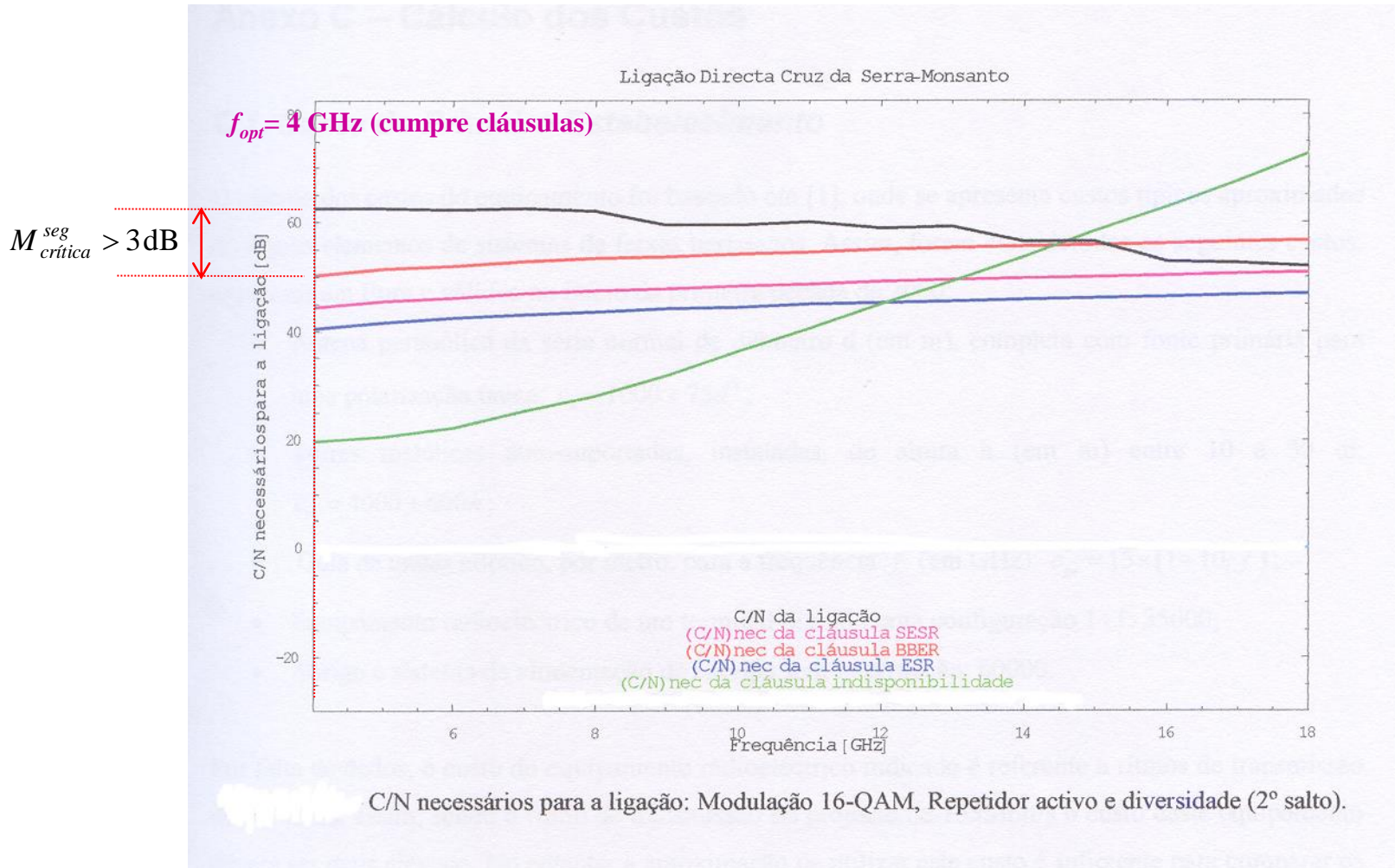
“Remédios” contra as reflexões

- Evitar que as ligações atravessassem zonas planas muito extensas (mar, lagos ou pântanos)
- Utilizar antenas suficientemente directivas (aumenta a discriminação raio directo/raio reflectido)
- Inclinar as antenas para cima (idem)
- Colocar uma antena muito mais elevada que a outra (aproxima a zona das reflexões da antena mais baixa)
- **Escolher a altura/localização das antenas, de modo a que o próprio terreno obstrua o raio reflectido**
- Utilização de diversidade espacial (duas antenas receptoras)

Escolha da frequência óptima



Escolha da frequência óptima (cont.)



Sequência de “tentativas” para verificar SESR, ESR, BBER (normas de qualidade)

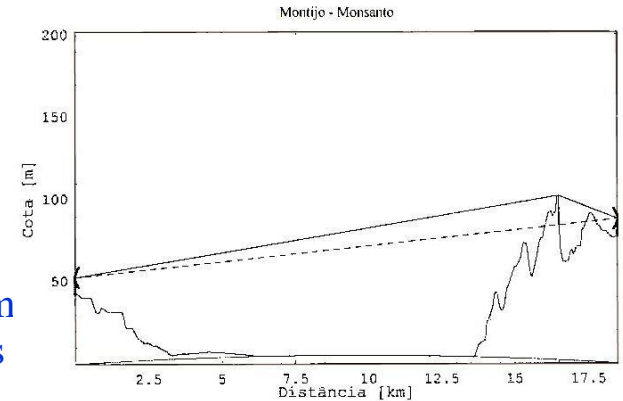
1. Percurso directo
2. Percurso alternativo (com repetidor passivo do tipo costas-com-costas)
- ~~3. Rep. passivo + Igualação (na frequência e no tempo)~~
- ~~4. Rep. passivo + Igualação + Diversidade dupla de espaço~~
5. Repetidor activo

Nota 1: Para débitos binários iguais ou inferiores a 8 Mbit/s o efeito do desvanecimento selectivo não se faz sentir (só o do desvanecimento uniforme); em consequência, não faz sentido usar igualação para estes débitos, pois o objectivo da igualação é reduzir os efeitos do desvanecimento selectivo, i.e., interferência intersimbólica. Assim, na janela 3.9 do Feixer, devem clicar apenas no botão “método 2” e introduzir uma assinatura de 0.1 MHz.

Nota 2: A solução final deve ter as antenas terminais e do repetidor, e a altura dos mastros, optimizados – o objectivo é verificar as normas de qualidade e fiabilidade com uma margem de segurança de 3 dB, **ao custo mínimo.**

Estações repetidoras

- A solução para ligações entre terminais sem ‘linha de vista’ passa pela introdução de estações repetidoras podem ser de dois tipos:
 - **Estações repetidoras activas** – A ligação inicial é ‘partida’ em ‘linha de vista’, existindo nas estações repetidoras introduzidas emissão (e normalmente amplificação e/ou regeneração);
 - Para efeito da verificação das normas de qualidade, cada salto é considerado individualmente.
 - **Estações repetidoras passivas** – A ligação inicial é ‘partida’ em mais do que 1 salto em ‘linha de vista’, introduzindo-se um repetidor, dito passivo, (raramente mais do que 1 por salto) por se limitar a ‘reflectir’ o sinal já que não possui qualquer equipamento de recepção, emissão ou amplificação.



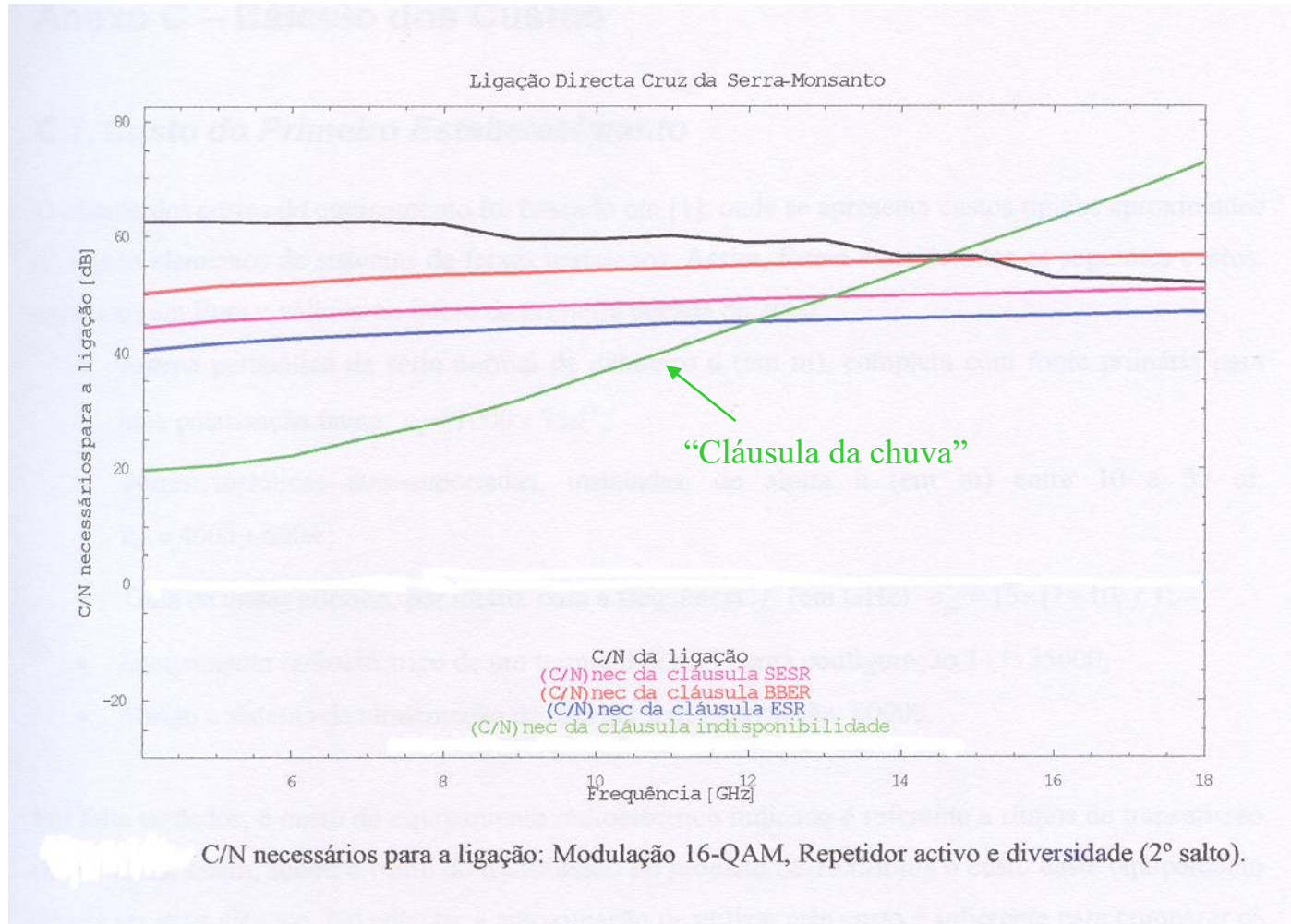


- A ITU-R considera um sistema de feixes digitais indisponível quando se verifica uma ou ambas das seguintes condições durante pelo menos 10 segundos consecutivos:
 - sinal digital interrompido, com perda de sincronismo ou de alinhamento
 - taxa de erros binários (BER) superior a 10^{-3}
- A indisponibilidade das ligações em feixes hertzianos é, principalmente, devida a:
 - equipamento – sobretudo avarias ou degradação
 - fenómenos atmosféricos – sobretudo chuva
 - Interferências com outros serviços
 - instalações e torres das antenas – e.g., desabamentos, sabotagens, etc.
 - actividade humana – erros de exploração ou manutenção

- Segundo a ITU-R, a indisponibilidade máxima numa ligação deverá ser $0.3 \times 280 / 2500$ % do tempo. Compete ao projectista da ligação distribuir a indisponibilidade total pelas diferentes causas relevantes; na ausência de outros critérios, é usual considerar para orçamento da indisponibilidade:
 - propagação (chuva) – 10%
 - equipamento – 40%
 - restantes causas – 50%

Nota: Para efeitos da realização do projecto em STele, verifica-se apenas a indisponibilidade devida à chuva (com o orçamento de 10%), i.é., admite-se que os orçamentos de 40% para equipamento e 50% para restantes causa, são suficientes para esses efeitos.

Exemplo



Voltando aos custos

Projecto da ligação

Terrenos para emissor/receptores e repetidores

Acessos e infra-estruturas (e.g., energia e comunicações)

Torres para antenas terminais e repetidores

Antenas (terminais e repetidores)

Emissores/Receptores (nos terminais e repetidores se activos)

Guias

Abrigo e sistema de alimentação de Energia sem Interrupção

Acessórios vários e sobressalentes

Nota: considerar apenas o que está a rosa

Custo dos equipamentos (em Euros)

- Antenas parabólicas (para $D \leq 4.5$ m)

- $c_a = 1000 + 75D^3$ D : diâmetro da antena [m]

- Torres metálicas auto-suportadas

- $c_{ta} = \begin{cases} 4000 + 600h & \text{para } 10 \leq h \leq 30 \\ 22500 + 16000(h - 30) & \text{para } 30 \leq h \leq 80 \end{cases}$ h : altura do mastro[m]

- Guias de onda elípticos

- $c_{ge} = 15 \times \left(1 + \frac{10}{f}\right) \times l_{guia}$ l_{guia} : comprimento dos guias [m]
 f : frequência da portadora [GHz]

- Emissor + receptor (1+1): 35 000 €
- Abrigo e sistema de alimentação de energia: 60 000 €

No ano t as receitas correspondentes ao tráfego telefónico são dadas por

$$r_t = n \times T_{tel} \times N \times C_3$$

onde:

- n é o número de canais telefónicos
- T_{tel} é o tráfego médio por canal telefónico no ano t (o inicial é $t=1$)

$$T_{tel} = (0.2 + 0.02 \times t) \text{ Erlang}$$

- N é o número máximo de chamadas num ano ($N=365,4 \times 24 \times 60 / 3$)
- C_3 é o custo de uma chamada de 3 minutos, no ano t

No ano t , as despesas são dadas por

$$d_t = 0.15 \times d_0 + T_{LB/ano}$$

onde

- $0.15 \times d_0$ são os encargos de exploração anuais (com energia, manutenção, etc.)
- $T_{LB/ano}$ é a taxa de utilização de banda, por ano (depende da LB e da frequência da portadora → consultar site da ANACOM)

Nota: Numa ligação bidireccional, o percurso de ida e o de volta têm de ter canais radioelétricos distintos (embora na mesma banda de frequências), pois se fosse usado o mesmo canal radioelétrico nos dois sentidos, os sinais de ida e de volta interferiam entre eles.

- Para se conseguir um valor residual nulo ao fim de 25 anos:

$$d_0 = \sum_{t=1}^{25} \frac{r_t - d_t}{(1+i)^t \times (1+tir)^t}$$

onde

- i é a taxa de inflação (3%)
 - tir é a taxa interna de retorno (10%)
- Considerando o *cash-flow* constante, $r_t - d_t = \text{cte}$, obtém-se:

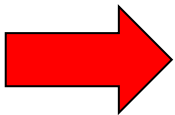
$$n \times T_{tel} \times N \times C_3 - 0.15 \times d_0 + T_{LB/ano} = d_0 / \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1+i)^t \times (1+tir)^t}$$

Custo de uma chamada

- A condição $r_t - d_t = \text{cte}$ conduz a que:

$$C_3(t) = \frac{d_0 / \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1+i)^t \times (1+tir)^t} + 0.15 \times d_0 + T_{LB/ano}}{n \times T_{tel} \times N}$$

- De notar que como o tráfego telefónico (T_{tel}) cresce ao longo dos anos, o custo de uma chamada telefónica baixará.



Representar, graficamente, a evolução do custo de uma chamada telefónica de 3 minutos, ao longo de 25 anos.

Custo de uma chamada de 3 minutos, C_3

$$C_3(t) = \frac{d_0 / \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1+i)^t \times (1+tir)^t} + 0.15 \times d_0 + T_{LB/ano}}{n \times T_{tel} \times N}$$

- $C_3(t)$ é o custo de uma chamada de 3 minutos no ano t
- d_0 é o custo inicial do projecto
- n é o número de canais telefónicos (120)
- T_{tel} é o tráfego médio por canal telefónico no ano t (o inicial é $t=1$)
$$T_{tel} = (0.2 + 0.02 \times t) \text{ Erlang}$$
- N é o número máximo de chamadas (de 3 minutos) num ano ($N = 365,4 \times 24 \times 60 / 3$)
- i é a taxa de inflacção (3%)
- tir é a taxa interna de retorno (10%)
- $T_{LB/ano}$ é a taxa anual de utilização da banda (ver no site da ANACOM)