

$f[\text{GHz}]$	Modulação	$LB[\text{MHz}]$	$\left(\frac{C}{N}\right)_{\min} [\text{dB}]$	$\left(\frac{C}{N}\right)_{\text{CIP}} [\text{dB}]$	Margem da ligação $[\text{dB}]$
5	64-QAM	40	55.50	59.12	3.62
6	64-QAM	29.65	56.26	60.65	4.39
	8-PSK	60	44.75	57.64	12.89
	16-QAM	60	49.02	58.89	9.87
11	64-QAM	40	58.78	64.13	5.35

**Tabela 16** – Margem crítica da ligação alternativa, com diversidade

Verificámos que com o uso de diversidade espacial, com as antenas distanciadas entre si de 10m, conseguimos obter sempre valores da margem de segurança acima do desejado, de modo que para a escolha da frequência e respectiva largura de banda apenas se terá em conta a possibilidade de optimização em termos económicos.

Inicialmente, ponderámos que a opção mais viável seria aquela que utilizasse menos largura de banda, e nesse sentido, a frequência de 6Ghz com LB de 29.65Mhz seria o caso de interesse. No entanto, como para o caso da modulação 8-PSK teríamos uma área física do espelho muito menor, decidimos comparar os custos mantendo todos os outros parâmetros iguais.

Apenas em termos de custos de largura de banda, utilizando os preços referidos no site da ANACOM temos para os dois casos:

- 6Ghz [29.65Mhz]  $\rightarrow 52 \times \sqrt{25.325} \times 29.65 \times 2 = \mathbf{15517,89\text{€/ano}}$
- 6Ghz [60Mhz, 8-PSK]  $\rightarrow 52 \times \sqrt{25.325} \times 60 \times 2 = \mathbf{31402,15\text{€/ano}}$

Em ambos os casos foi possível fazer optimizações relativamente à diminuição da área física do espelho plano:

- 6Ghz [29.65Mhz]  $\rightarrow$  Custo do espelho plano de área física  $29,83\text{m}^2$ : **21122,5€**
- 6Ghz [60Mhz, 8-PSK]  $\rightarrow$  Custo do espelho plano de área física  $11,24\text{m}^2$ : **7180€**

Tal como se esperava, verificou-se um menor valor nas despesas no total de 1941,76€ para o caso da modulação 64-QAM, largura de banda de 29.65 Mhz,  $f=6\text{Ghz}$ , e consequentemente, foi analisada esta opção mais em detalhe. Na próxima secção encontram-se as características relevantes desta ligação em termos de custos.

## 4. Análise de custos

→ Ver Anexo C

Nesta secção irá realizar-se uma análise dos custos relativamente a todas as opções consideradas viáveis (isto é, aquelas que cumprem os requisitos mínimos da ITU-R) e será então escolhida aquela que apresentar menores custos de chamada.

Para a escolha dos mastros de suporte às antenas tivemos que ter em conta o ângulo de torção, dado que as torres espiadas apenas suportam um ângulo máximo de  $\pm 0,5^\circ$ . Neste projecto temos duas zonas urbanas, logo escolheu-se torres auto-suportadas, já que ocupam uma área de solo bastante inferior à das torres espiadas.

Nos modelos de ligação em que se utiliza repetidores passivos tem que se incluir diversidade. Isto vai provocar a existência de equipamentos extra.

	Item	Quantidade	Características	Preço Unidade [€]	Preço [€]
Investimento Inicial	Abrigo e Sistema de Alimentação	2	-	50000,00	100000,00
	Equipamento Emissor + Receptor	4	-	35000,00	140000,00
	Antena Parabólica	4	d = 4.572m	8167,70	32670,80
	Espelho Plano	2	a = 29.83m <sup>2</sup>	21122,50	42245,00
	Torre Espiada	1	h = 25m	11000,00	11000,00
	Torre Metálica	2	h = 20m	16000,00	32000,00
	Guias de Onda	4	L=110m	40,00/m	4400,00
	Licença de Emissão	2		10	20,00
	Total				362335,8
Custo Anual	Aluguer de Banda	2	-	7758,95	15517,90
	Manutenção	15% Investimento Inicial			54350,37
	Total				69868,27

**Tabela 17 – Análise de custos na ligação Barreiro-Sesimbra via Serra do Zambujal (Repetidor Passivo de Espelho Plano)**

	Item	Quantidade	Características	Preço Unidade [€]	Preço [€]
Investimento Inicial	Abrigo e Sistema de Alimentação	2	-	50000,00	100000,00
	Equipamento Emissor + Receptor	4	-	35000,00	140000,00
	Antena Parabólica	8	d = 4.572m	8167,70	65341,60
	Torre Espiada	1	h = 30m	12500,00	12500,00
	Torre Metálica	2	h = 30m	22000,00	44000,00
	Guias de Onda	8	L = 40m	28/m	8960,00
	Licença de Emissão	2		10,00	20,00
	Total				370821,00
Custo Anual	Aluguer de Banda	2		7744,00	15488,00
	Manutenção	15% Investimento Inicial			55623,15
	Total				71111,15

**Tabela 18 – Análise de Custos na ligação Barreiro-Sesimbra via Santana**  
**(Repetidor Passivo de Costas com Costas)**

	Item	Quantidade	Características	Preço Unidade [€]	Preço [€]
Investimento Inicial	Abrigo e Sistema de Alimentação	3	-	50000,00	150000,00
	Equipamento Emissor + Receptor	4	-	35000,00	140000,00
	Antena Parabólica	2	d = 3.6576m	4669,90	9339,72
		2	d = 0.60m	1016,20	2032,40
	Torre Espiada	1	h = 15m	8000,00	8000,00
	Torre Metálica	2	h = 15m	10000,00	20000,00
	Guias de Onda			40/m	3600,00
	Licença de Emissão	3		10,00	30,00
	Total				333002,12
Custo Anual	Aluguer de Banda	2		7584,65	15169,30
	Manutenção	15% Investimento Inicial			49950,32
	Total				65119,62

**Tabela 19 - Análise de Custos na ligação Barreiro-Sesimbra via Santana**  
**(Repetidor Activo)**

## 5. Solução final

Foi escolhida como solução final a ligação directa entre Barreiro e Sesimbra com recurso a repetidor activo em Santana, pois cumpre todas as especificações da ITU-R e é a menos dispendiosa.

### 5.1. Cálculo da semi-banda

Obtiveram-se os melhores resultados em termos funcionamento e em termos financeiros para a frequência de 6 GHz, largura de banda de 29.65Mhz.

Nos 500Mhz de largura de banda disponível para esta frequência, podem estabelecer-se até 8 canais radioeléctricos de ida e 8 canais de retorno, num plano de frequências entrelaçado (ou duplamente entrelaçado), em que a frequência central dos canais radioeléctricos é dada, em Mhz, por:

- Semibanda Inferior:  $f_n = f_0 - 259.45 + 29.65 \times n$
- Semibanda superior:  $f_n' = f_0 - 7.41 + 29.65 \times n$

em que  $n = 1,2,3,4,5,6,7,8$  e  $f_0=6.175$  GHz

<i>Troço Barreiro – Santana</i>			
<i>Semibanda inferior</i> [GHz]	<i>Margem da Ligação</i> [dB]	<i>Semibanda superior</i> [GHz]	<i>Margem da Ligação</i> [dB]
5.945	4.945	6.197	4.894
5.975	4.939	6.227	4.888
6.005	4.934	6.257	4.882
6.034	4.928	6.286	4.875
6.064	4.922	6.316	4.868
6.093	4.921	6.345	4.862
6.123	4.911	6.375	4.855
6.153	4.903	6.405	4.554

Tabela 20 – Margem da ligação para as semibandas no 1º troço

<i>Troço Santana – Sesimbra</i>			
<i>Semibanda inferior</i> [GHz]	<i>Margem da Ligação</i> [dB]	<i>Semibanda superior</i> [GHz]	<i>Margem da Ligação</i> [dB]
5.945	34.764	6.197	34.798
5.975	34.769	6.227	34.801
6.005	34.774	6.257	34.803
6.034	34.779	6.286	34.804
6.064	34.783	6.316	34.806
6.093	34.788	6.345	34.807
6.123	34.791	6.375	34.408
6.153	34.794	6.405	34.402

Tabela 21 – Margem da ligação para as semibandas no 2º troço

## 5.2. Especificações da banda escolhida

Débito binário bruto			159.52 Mbit/s
Frequência			5.945 GHz
Largura de banda			29.65 MHz
Factor de excesso de banda			0.1
Largura de banda ocupada em radiofrequência, $b_{orf}$			29.24 MHz
Número de níveis por palavra			64
Modulação utilizada			QAM
Factor de ruído			6.189 dB
Altura do mastro do Barreiro			10 m
Diâmetro da antena no terminal do Barreiro			3.6576 m
Altura do mastro do repetidor activo			10 m
Antenas no repetidor activo	Orientação Barreiro	Altura	10 m
		Diâmetro	3.6576
	Orientação Sesimbra	Altura	15 m
		Diâmetro	0.6 m
Altura do mastro de Sesimbra			15 m
Diâmetro da antena no terminal de Sesimbra			0.6 m
Ganho de emissão da antena do Barreiro			44.55 dBi
Ganho de recepção da antena do repetidor activo			44.55 dBi
Ganho de emissão da antena do repetidor activo			29.21 dBi
Ganho de recepção da antena de Sesimbra			29.21 dBi
Rendimento das antenas			55%
Atenuação de espaço livre (Troço Barreiro – Repetidor)			134.94 dB
Atenuação de espaço livre (Troço Repetidor – Sesimbra)			113.34 dB
Atenuação de obstáculo (Troço Barreiro – Repetidor)			0 dB
Atenuação de obstáculo (Troço Repetidor – Sesimbra)			0dB
Atenuação da atmosfera (Troço Barreiro – Repetidor)			0.27 dB
Atenuação da atmosfera (Troço Repetidor – Sesimbra)			0.023 dB
Atenuação dos guias (Troço Barreiro – Repetidor)			0.78 dB
Atenuação dos guias (Troço Repetidor – Sesimbra)			1.14 dB
Folga dos guias			10 m
$p_d/p_s$ (Troço Barreiro – Repetidor)			$\infty$
$p_d/p_s$ (Troço Repetidor – Sesimbra)			$\infty$
Potência de emissão (Barreiro)			-4.52 dBW
Potência de recepção (Repetidor)			-52.18 dBW
Potência de emissão (Repetidor)			-4.73 dBW
Potência de recepção (Sesimbra)			-61.78 dBW
Factor de redução da área da assinatura (fase mínima)			490
Factor de redução da área da assinatura (fase não mínima)			35
$(C/N)_{opt}$ (Barreiro – Repetidor)			4.945 dB
$(C/N)_{opt}$ (Repetidor – Sesimbra)			34.764 dB

### 5.3. Análise da fiabilidade

A indisponibilidade de uma ligação por feixes hertzianos deve-se em grande parte a avarias no equipamento, resultantes de desgaste ou de problemas no sistema de alimentação de energia. Todos os componentes constituintes da ligação possuem um determinado tempo útil de vida, e que no nosso caso foram considerados os seguintes:

- $MTBF_{\text{emissor}} = 120000 \text{ h}$
- $MTBF_{\text{desmodulador}} = 140000 \text{ h}$
- $MTBF_{\text{modulador}} = 200000 \text{ h}$
- $MTBF_{\text{receptor}} = 200000 \text{ h}$
- $MTTR = 6 \text{ h}$

Estes valores conduzem a um tempo médio entre avarias de uma série de elementos usando 1 canal bidireccional de 19626,2 h.

A indisponibilidade associada ao equipamento, como já foi referido anteriormente, é considerada 40% da indisponibilidade total e tem o valor de  $I_{\text{equip}} = 1.344 \times 10^{-4}$ , logo, não cumpre as recomendações da ITU-R.

Foi então necessário utilizar uma configuração 1+1 (um elemento de reserva e outro de serviço em paralelo), em que são necessários 2 comutadores, 1 em cada terminal.

O tempo médio entre avarias do comutador 1+1 é  $MTBF_{\text{comutador1}} = 90000 \text{ h}$ , enquanto que no caso dos comutadores numa ligação bidireccional é  $MTBF_{\text{comut}} = 45000 \text{ h}$ .

A adopção de um canal de reserva permite-nos obter os seguintes valores:

- Tempo médio entre avarias da ligação, excluindo comutadores :  $MTBF_{\text{bir}} = 6.41977 \times 10^7 \text{ h}$
- Tempo médio entre avarias da ligação, incluindo comutadores :  $MTBF_{\text{ligação}} = 44968.5 \text{ h}$
- Indisponibilidade devido ao equipamento :  $I_{\text{equip}} = 1.33427 \times 10^{-4}$

Consequentemente, a indisponibilidade devido ao equipamento cumpre a recomendação da ITU-R.

# ANEXOS

## **ANEXO B – Cálculo do ganho dos vários repetidores passivos**

### **Repetidor Passivo Montagem Costas com Costas**

Para este repetidor é necessário calcular a área efectiva para a frequência de 11GHz. Projectou-se com antenas de diâmetro de 4,572 m.

O ganho de uma antena é obtido através da expressão:

$$G = 20 \log \left( \frac{\pi * 4.5 * \text{frequência}}{300} \right) + 10 \log(0.5) = 51.42 \text{ dB}$$

A partir deste ganho pode-se obter o do repetidor costas com costas através de:

$$G_{rep} = 2 * G - A_{guia}$$

Nesta montagem considerou-se que as duas antenas estão ligadas por guia de 1m  $A_{guia} = 0.04 \text{ dB}$ .

$$\text{Ficamos com } G_{rep} = 2 * 51.42 \text{ dB} - 0.04 \text{ dB}$$

Dado que o repetidor se encontra junto a um dos terminais verificou-se se este estava na zona próxima. Para tal utilizou-se a seguinte expressão:

$$d > d_{min} = \frac{2 d_a^2}{\lambda}$$

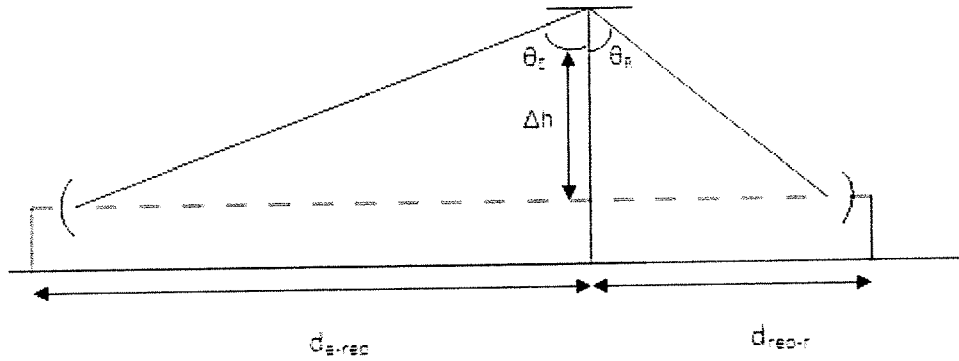
Verificou-se que não se encontra na zona próxima, logo não será necessário fazer qualquer correcção no ganho do repetidor passivo.

$$G_{rep} = G_{espelho} = 20 \log \left( \frac{4 * \pi * a_{ef}}{\gamma^2} \right) = 102.80 \text{ dB}$$

$$\text{Logo, } a_{ef} = 8.16 \text{ m}^2$$



## Repetidor Passivo Espelho Plano



**Figura 12** – Esquema de montagem com Repetidor de Espelho Plano

Através do esquema anterior podem-se calcular as expressões de  $\theta_E$   $\theta_R$ :

$$\theta_E = \tan^{-1} \left( \frac{d_{e-rep}}{\Delta h} \right), \text{ com } \Delta h = y_{rep} + h_{rep} - (y_E + h_E)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left( \frac{d_{rep-r}}{\Delta h} \right), \text{ com } \Delta h = y_{rep} + h_{rep} - (y_R + h_R)$$

Considerando esfericidade da Terra:

Emissor:  $y = -\frac{(x_E - \frac{d}{2})^2}{2r_E}$

Repetidor:  $y = -\frac{(x_{rep} - \frac{d}{2})^2}{2r_E}$

Receptor:  $y = -\frac{(x_R - \frac{d}{2})^2}{2r_E}$

$$a_{fisica} = \frac{a_{efectiva}}{\cos(\text{angulo de incidência})}$$

que terá associado a si um  $MTBF_{comut} = 45000$  horas. Embora o novo canal de reserva esteja associado em paralelo ao inicial, os dois comutadores terão que estar associados em série entre si e com ambos os circuitos. Dessa forma o tempo médio a si associado passará a ser de  $MTBF_{comutador1} = 2 \times MTBF_{comut} = 90000$  horas.

Os novos valores obtidos são  $MTBF_n = 44968.5$  horas e  $I_{equip} = 1.33427 \times 10^{-4} < I_{max.equip}$ . Passando assim a ser cumprida a recomendação da *ITU-R* para a indisponibilidade devido ao equipamento.

## 6 Análise de Custos

O custo da ligação, tal como sugerido no enunciado do projecto, terá em vista um período de vida de projecto de 25 anos. Este deve ser realizado por forma a que no final dos 25 anos o valor residual seja nulo, por outras palavras, a diferença entre o valor do investimento e o saldo de tesouraria ao longo dos 25 anos de actividade tem que ser igual a 0.

Neste ponto serão, apenas, alvo de estudo as ligações que sugeriram uma *Margem de Segurança* superior a 3 dB.

### 6.1 Investimento Inicial

Fazem parte desta parcela todos os custos de implementação do projecto: custos com equipamento, estudos, despesas ao nível de infra-estruturas, terrenos, de fornecimento de energia, etc.

No caso do nosso projecto serão apenas contabilizados os custos com equipamento, para tal, teve-se o cuidado de colocar as estruturas (emissor, repetidor e receptor) perto zonas habitadas, só assim se podem desprezar as despesas com o fornecimento de energia.

O custo associado ao material pode ser obtido no Anexo C do manual da cadeira:

- **Antenas:**  $c_a = 1000 + 75 \times d_a^3$ ;
- **Mastros:**  $c_{ta} = 4000 + 600 \times h_m$ ,  $10 \leq h \leq 30$ ;
- **Guias de Onda:**  $c_{ge} = 15 \times \left(1 + \frac{10}{f}\right) \times d$ ;
- **Emissor e Receptor (1+1):** 35000€;

- Abrigo e Sistema de Alimentação de Energia sem Interrupção: 60000€;
- Taxa de Emissão de Licença de Estação: 10€;
- Espelho:  $c_e = 2500 + 750 * (s - 5)$ ,  $5 \leq s \leq 20$ ;

**Nota:** Embora a expressão do preço do espelho plano esteja limitada a uma área de 20 m<sup>2</sup> iremos usar essa mesma expressão para espelhos até 35 m<sup>2</sup>

Quando não referido o diametro das antenas é de 4.572 m (15 pés).

Abaixo estará descrito de forma detalhada o custo associado à implementação de um feixe na faixa dos 7 GHz com antenas de  $d_a = 4.572$  m e  $\eta = 50\%$ , sem diversidade, para todos os outros casos será apenas apresentado o resultado final dos custos.

	Dimensão	Quantidade	Custo Unit.[€]	Custo [€]
Antenas	4.572	4	8 167.70	32 670.81
Mastros	15	2	13 000.00	26 000.00
	10	1	10 000.00	10 000.00
Guias de Onda	(10+15)	2	910.71	1 821.43
E+R(1+1)	-	2	35 000.00	70 000.00
Abrigo + Sist. Alim.	-	2	60 000.00	120 000.00
Licença	-	1	10	10
Espelhos	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	-	-	-	260 502.24

Tabela 2: Tabela 6.1 - Exemplo de calculo de custos

Para os restantes casos:

- Faixa: 13 GHz,  $\eta = 55\%$ , sem diversidade: 260 007.73 €;
- Faixa: 6 GHz,  $\eta = 50\%$ , com diversidade: 375 361.70 €;
- Faixa: 7 GHz,  $\eta = 50\%$ , com diversidade, antenas do repetidor de 10 pés: 335 185.82 €; (-)
- Faixa: 8 GHz,  $\eta = 50\%$ , com diversidade: 375 376.61 €;
- Faixa: 11 GHz,  $\eta = 50\%$ , com diversidade: 375 069.80 €;

- *Faixa: 13 GHz,  $\eta = 50\%$ , com diversidade: 374 943.92 €; (-)*
- *Faixa: 7 GHz,  $\eta = 95\%$ , com diversidade, espelho plano de  $35m^2$ : 376 866.52 €; (-)*

As arquitecturas marcadas com (-) podem, desde já ser postas de parte pois existem outras, que para a mesma faixa de frequência apresentam custo inicial menor.

## 6.2 Evolução dos Custos de Exploração

Na análise da evolução dos custos é importante ter em conta os encargos de exploração anual, que no caso do nosso projecto, vamos considerar igual a 15% do valor inicial investido. É, também, preciso ter em consideração o custo inerente à taxa de utilização da largura de banda, o qual é cobrado semestralmente:  $T_{LB} = T \times \sqrt{L_{[Km]}} \times LB_{[MHz]}$ ,  $T = 52$  para as Faixas de 6 - 11 GHz e  $T = 27.5$  para a Faixa dos 13 GHz.

Sendo assim, e para a nossa ligação de 21.729 Km:

Faixa [GHz]	$T_{LB}$ num ano [€]
6	19 391.58
7	22 300.32
8	14 374.01
11	19 391.58
13	14 357.23

valor residual =  
=  $d_0 - val$   
Para valor residual = 0  
 $\Rightarrow d_0 = val$

O valor actual líquido pode ser calculado através da seguinte fórmula :

$$val = \sum_{t=1}^N \frac{r_t - d_t}{(1+i)^t \times (1+j)^t}$$

em que  $N$  é o ano em que se quer calcular o  $val$ ,  $r$  e  $d$  respectivamente as receitas e despesas de um dado ano,  $i$  a taxa de inflação e  $j$  a taxa de actualização anual.

Para o valor residual ser nulo, o  $val$  para  $N = 25$  tem que ser igual ao  $d_0$ , investimento inicial, com uma taxa interna de retorno,  $j = tir = 10\%$ .