

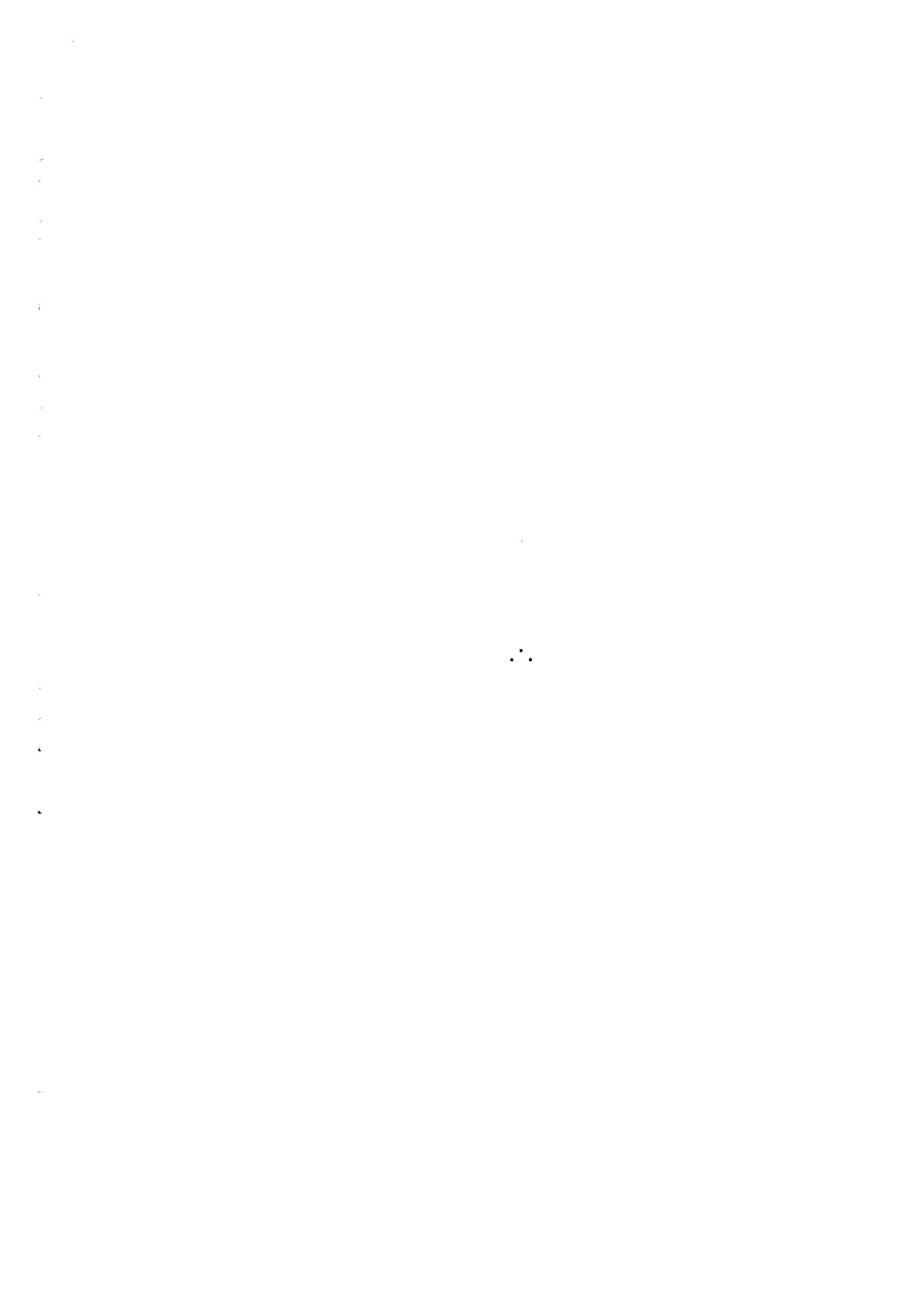
1. Publicação nº <i>INPE-2306-PRE/073</i>	2. Versão	3. Data <i>janeiro, 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DEE</i>	Programa <i>ESTAÇÕES DE CONTROLE E RASTREIO</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>TELEMETRIA ESTAÇÃO MÓVEL</i> <i>TELECOMANDO ANTENAS</i>			
7. C.D.U.: <i>621.369.67-519</i>			
8. Título <i>INPE-2306-PRE/073</i> <i>PROJETO DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA DE ANTENAS PARA ESTAÇÃO MÓVEL DE RASTREAMENTO DE BALÃO ESTRATOSFÉRICO</i>		10. Páginas: <i>62</i>	
		11. Última página: <i>51</i>	
9. Autoria <i>Satoshi Koshima</i>		12. Revisada por  <i>Clovis Solano Pereira</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
14. Resumo/Notas <i>O trabalho descreve o projeto de um sistema de antenas para telemetria e telecomandos em VHF e UHF, o qual vai equipar as estações rastreadoras do INPE destinadas a balões estratosféricos. Idealizou-se uma solução totalmente original, ou seja, a utilização da antena bi-helicoidal funcionando simultaneamente como transmissora em 460 MHz e receptora em 240 MHz, e a da antena Yagi otimizada com quatro elementos operando em 126,8 MHz. Uma vez resolvido esse problema, as respectivas antenas das estações fixas de São José dos Campos e Cachoeira Paulista resultaram daquelas projetadas para a estação móvel, requerendo tão somente pequenas modificações.</i>			
15. Observações <i>Submetido para apresentação na 33a. Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Salvador, BA, julho de 1981.</i>			

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Clovis Solano Pereira pelo incentivo constante em todas as fases desse projeto, pela cooperação inestimável na definição do sistema de antenas e sua disposição física, assim como pela revisão técnica cuidadosa desse trabalho.

Ao Dr. Inácio Malmonge Martin pelos esclarecimentos sobre as finalidades dos balões científicos, e sobre a filosofia de funcionamento das estações rastreadoras.

Ao Noboru Sato pela sua ajuda imprescindível no projeto mecânico das antenas e do filtro helicoidal.



ABSTRACT

This work outlines the project of an antenna system for telemetry and telecommand in VHF and UHF, which is part of the tracking stations of INPE for the stratospheric balloons. A completely new solution was found, which was presented by a bihelical antenna working simultaneously as a transmitting antenna in 460 MHz and as a receiving antenna in 240 MHz and by an optimized four elements Yagi antenna operating in 126.8 MHz. Solved this problem, the correspondent antennas for the main and secondary fixed stations of São José dos Campos and Cachoeira Paulista followed from the mobile stations antennas, requiring only small modifications.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - SISTEMA DE ESTAÇÕES DO INPE PARA RASTREAMENTO DE BALÕES ESTRATOSFÉRICOS	2
2.1 - Balões estratosféricos	2
2.2 - Estações rastreadoras de balões do INPE	3
2.2.1 - Estação principal em São José dos Campos	6
2.2.2 - Estação auxiliar em Cachoeira Paulista	6
2.2.3 - Estação móvel	7
3 - SISTEMAS DE TELECOMANDO, TELEMETRIA E RASTREAMENTO DE BALÃO ..	11
3.1 - Localização da posição geográfica do balão em voo	11
3.2 - Sistema de telemetria em 238,5 MHz	13
3.2.1 - Cálculo de enlace de telemetria	13
3.3 - Sistema de telecomando científico em 460 MHz	15
3.3.1 - Cálculo de enlace de telecomando científico	16
3.4 - Sistema de telecomando operacional em 126,8 MHz	17
3.4.1 - Cálculo do enlace de telecomando operacional em 126,8 MHz.	17
4 - PROJETO DE ANTENAS PARA ESTAÇÃO MÓVEL	19
4.1 - Requisitos existentes	19
4.2 - Solução global	21
4.3 - Projeto da antena Yagi otimizada	23
4.3.1 - Obtenção da configuração otimizada	23
4.3.2 - Características da antena otimizada	24
4.4 - Projeto da antena bi-helicoidal	30
4.4.1 - Concepção da antena bi-helicoidal	30
4.4.2 - Características da antena bi-helicoidal	32
4.5 - Disposição física das antenas ("layout")	43

	<u>Pág.</u>
5 - ANTENAS PARA ESTAÇÕES FIXAS	45
6 - SUBPRODUTO DO PROJETO: FILTRO HELICOIDAL EM 240 MHz	45
6.1 - Características do filtro helicoidal	46
6.1.1 - Atenuação de transmissão	46
6.1.2 - Perda de inserção	47
6.1.3 - Perda de retorno	47
7 - CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Sistemas de estações do INPE para rastreamento do balão <u>es</u> tratosférico	5
2 - Alcance do sistema de rastreamento do INPE, com lançamen to de balão em Cachoeira Paulista	9
3 - Operação da estação móvel em época de "turn around" com o alcance indicado, supondo o lançamento de balão em Brasília	10
4 - Determinação da posição geográfica do balão	12
5 - Diagrama de radiação da antena Yagi de 4 elementos em 123,7 MHz	25
6 - Diagrama de radiação da antena Yagi de 4 elementos em 125,9 MHz	26
7 - Diagrama de radiação da antena Yagi em 129,4 MHz	27
8 - Comportamento da diretividade da antena Yagi otimizada com frequência	28
9 - Comportamento em frequência da impedância da antena Yagi de 4 elementos após o casamento de impedância	29
10 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 211 MHz ..	33
11 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 239 MHz ...	34
12 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 270 MHz ..	35
13 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 401 MHz ..	38
14 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 460 MHz ..	39
15 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 520 MHz ..	40
16 - Desenho esquemático da disposição física ("layout") das an tenas no teto da cabine da estação móvel, com dimensões em cm	44
17 - Curva de atenuação de transmissão do filtro helicoidal de três seções circulares	47
18 - Perda de inserção do filtro helicoidal de três seções cir culares	48
19 - Perda de retorno num acesso do filtro helicoidal de três seções circulares	48

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Balanço de perdas e ganhos no enlace de telemetria	14
2 - Balanço de perdas e ganhos do enlace de telecomando científico	16
3 - Balanço de perdas e ganhos do enlace de telecomando operacional	18
4 - Configuração otimizada com 4 elementos	24
5 - Comparação dos ângulos de meia potência da antena bi-helicoidal e helicoidal isolada	37
6 - Comparação entre ângulos de meia potência da antena bi-helicoidal e da helicoidal isolada	41
7 - Desacoplamento entre antenas de telemetria e telecomando ...	42

1 - INTRODUÇÃO

O trabalho em si consiste no desenvolvimento das antenas para as estações fixas de rastreamento em São José dos Campos e Cachoeira Paulista, assim como para a estação móvel, totalizando nove antenas:

- a) Antenas para telecomando operacional em 126,8 MHz
- b) Antenas para telemetria em 238,5 MHz.
- c) Antenas para telecomando científico em 460 MHz.

No desenvolvimento do sistema, a maior dificuldade foi resolver o problema, aparentemente impossível, de abrigar no teto da cabine da estação móvel quatro antenas relativamente grandes, todas móveis, necessitando cada uma de espaço livre para rotação completa, além da posição de assegurar ganhos mínimos às mesmas.

A solução desse problema técnico bastante singular foi conseguida graças à idealização de uma antena totalmente original, ou seja a antena bi-helicoidal. Essa antena funciona simultaneamente como transmissora de telecomando em 460 MHz e receptora de sinal de telemetria em 238,5 MHz, possuindo, surpreendentemente, características bastante satisfatórias. Ao lado dessa solução inovadora, foi utilizado um programa de otimização de antena Yagi para a definição da configuração geométrica de quatro elementos, usada como antena de telecomando em 126,8 MHz.

Essas antenas de telecomando e de telemetria, concebidas fundamentalmente para a estação móvel, após algumas modificações originaram as respectivas antenas das estações fixas em São José dos Campos e Cachoeira Paulista.

Como subproduto desse projeto de antenas, pode ser citado o desenvolvimento de um filtro helicoidal de três elementos em 240 MHz, apresentando características excelentes quanto à perda de inserção e atenuação de transmissão.

2 - SISTEMA DE ESTAÇÕES DO INPE PARA RASTREAMENTO DE BALÕES ESTRATOSFÉRICOS

Os experimentos científicos a bordo de balões estratosféricos necessitam de uma infra-estrutura específica e razoavelmente sofisticada, o que por sua vez implica enormes benefícios técnicos no que se refere ao desenvolvimento de instrumentos de medição e equipamentos de transmissão e recepção, aos sistemas digitais para aquisição e ao eventual pré-processamento de dados científicos e ambientais, e até mesmo ao desenvolvimento futuro do Sistema Omega de Radionavegação com vista à localização mais precisa de balão em voo.

Como esse projeto de antenas é parte integrante do desenvolvimento de um sistema relativamente complexo de suporte técnico ao experimento de balão científico, foram introduzidas nesse trabalho, notas explicativas gerais sobre os balões estratosféricos e também sobre as estações rastreadoras do INPE para os mesmos. Isso foi feito tendo em vista a necessidade dessa visão global para compreender as séries de condições impostas a esse projeto.

2.1 - BALÕES ESTRATOSFÉRICOS

O balão estratosférico é de grande utilidade como veículo portador de cargas úteis para pesquisa em várias áreas que necessitam efetuar medidas entre solo e altitudes de até 45 km.

No Brasil, essas pesquisas foram iniciadas em 1968 com pequenas experiências, chegando atualmente a experimentos com uma tonelada de material e com permanência no teto de voo de até 20 horas.

No INPE, as experiências se destinam a estudar a radiação X e gama de origem atmosférica e extraterrestre. Medidas de campo elétrico e magnético assim como de radiação infravermelha também tem sido efetuadas e fazem parte das atividades de Departamento de Astrofísica do INPE.

Várias colaborações internacionais na área de Astrofísica e Geofísica Espacial foram e serão realizados, principalmente com laboratórios da França, Itália e Estados Unidos.

Também na fase de testes e ensaios de equipamentos e componentes a serem instalados em satélite, utiliza-se o balão como veículo portador em altitudes de até 45 km, passando por temperaturas de até -90°C e pressão atmosférica variando de 940 milibares até 2 milibares.

Há grande interesse internacional para a utilização de balões estratosféricos no Hemisfério Sul, principalmente no Brasil, devido à falta de medidas em várias áreas, no que diz respeito à radiação X, gama, partículas carregadas, ultravioleta e infravermelho. Principalmente no Sul do Brasil, devido à presença de anomalia magnética e do centro galático passar no zênite em nossa latitude, torna-se particularmente atrativa a utilização dessa técnica de balão estratosférico, pois facilita, em muito, a pesquisa dessas radiações provenientes do espaço, que chegam à superfície da Terra.

2.2 - ESTAÇÕES RASTREADORAS DE BALÕES DO INPE

Como foi descrito na Seção 2.1, o balão estratosférico coleta dados científicos e ambientais, que são transmitidos às estações de rastreamento em tempo real, onde esses dados são armazenados em fitas magnéticas e depois analisados pelos cientistas interessados nos experimentos.

As estações rastreadoras cumprem fundamentalmente as seguintes finalidades:

- Determinar a posição geográfica do balão em voo.
- Receber o sinal de telemetria contendo dados científicos coletados pelo balão.

- Transmitir comandos para modificar os estados dos equipamentos de bordo ou instrumentos científicos.
- Transmitir comando para terminar o experimento.
- Processar o sinal de telemetria e armazená-lo em unidades de fita magnética.

O conjunto das estações rastreadoras em implantação no INPE é composto de:

- Estação principal em São José dos Campos, cidade com posição geográfica dada por latitude de $23^{\circ} 12' S$ e longitude de $45^{\circ} 51' W$
- Estação auxiliar em Cachoeira Paulista (latitude $22^{\circ} 50' S$ e longitude $45^{\circ} 12' W$)
- Estação móvel que pode ser localizada no ponto geográfico desejado.

A estação principal em São José dos Campos já funciona operacionalmente, enquanto que as outras duas estações entrarão em funcionamento ainda em 1981.

A configuração esquematizada desse sistema de estações rastreadoras, com as distâncias aproximadas entre si, é apresentada na Figura 1.

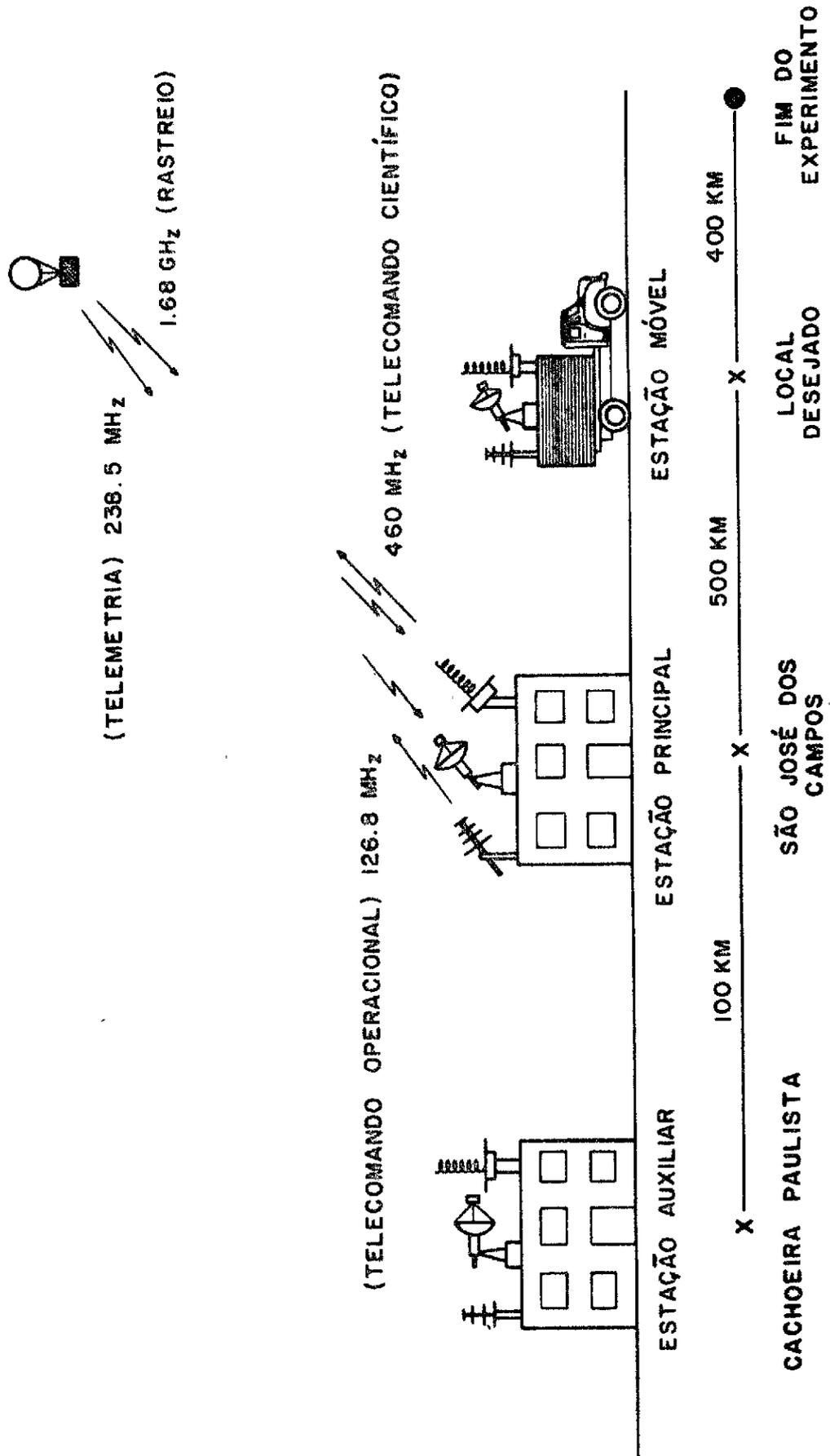


Fig. 1 - Sistema de estações do INPE para rastreamento do balão estratosférico.

2.2.1 - ESTAÇÃO PRINCIPAL EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

A localização da estação principal de rastreamento do balão foi decidida em favor de São José dos Campos, visto que a infraestrutura técnica em termos de equipe, oficina mecânica, centro de processamento de dados e outras facilidades, está centralizada nessa cidade, onde fica a sede do INPE.

Isso minimiza os custos dos experimentos com balões, porém restringe a certos períodos de ano as janelas de lançamento em Cachoeira Paulista, onde fica a base principal de lançamentos de balões do INPE. Isto ocorre devido ao fato da trajetória do voo do balão depender do vento estratosférico, que sazonalmente varia de leste para oeste ou em sentido contrário.

Como Cachoeira Paulista está situada a apenas 80 km do litoral, os voos com trajetórias de oeste para leste não poderiam ser lançados desta cidade, pois o balão fatalmente seguiria para o mar, impossibilitando o resgate da carga útil.

O alcance da estação principal é da ordem de 500 km, e está sendo limitado pelo sistema atual de determinação da posição geográfica do balão em voo, em razão da imprecisão inevitável em ângulos de rastreios próximos do horizonte. No entanto, os sinais de telemetria já foram recebidos a distâncias superiores a 500 km, o que indica que alterando o sistema de determinação da coordenada geográfica do balão para o Sistema Omega de Radionavegação, o alcance dessa estação poderá ainda ser um pouco aumentado.

2.2.2 - ESTAÇÃO AUXILIAR EM CACHOEIRA PAULISTA

A base principal de lançamentos de balões fica em Cachoeira Paulista, onde o INPE tem uma grande área disponível. Nessa localidade já existe uma grande pista desobstruída, e com toda infraestrutura montada para efetuar os lançamentos.

Apenas do ponto de vista de experimento com balões, seria melhor que o centro de rastreio ficasse no mesmo local de lançamento, ou seja em Cachoeira Paulista, ao invés de São José dos Campos. No entanto, essa opção foi desconsiderada devido à necessidade de duplicação do apoio técnico do INPE, atualmente centralizado em São José dos Campos.

Desse modo, a estação de Cachoeira Paulista funciona apenas para monitorar o vôo do balão durante os cinco minutos iniciais, após o que todo rastreio é realizado pela estação principal em São José dos Campos.

Apesar da cobertura de vôo durante os cinco minutos iniciais necessitar alcance de rastreio bem limitado, preferiu-se reproduzir, na medida do possível, a estação principal de São José dos Campos, fixando o alcance em 500 km. Isso tem se tornado viável ao acomodar, nessa estação, os equipamentos próprios trazidos muitas vezes pelas equipes científicas de instituição de pesquisas do exterior.

Dessa forma, dados científicos poderiam ser obtidos pela equipe científica convidada, na estação secundária, independentemente da estação principal.

Além dessa versatilidade conseguida com duas estações fixas de mesmo alcance, ter-se-ia com a estação auxiliar, concebida dessa forma, uma estação reserva em caso de alguma falha eventual da estação principal de São José dos Campos, assegurando, portanto, a obtenção de dados experimentais, mesmo nessa condição.

2.2.3 - ESTAÇÃO MÓVEL

A estação móvel do INPE consiste em uma cabine com equipamentos abrigados em seu interior e antenas com pedestais instalados em seu teto. Essa cabine está montada sobre o chassis de um caminhão, oferecendo assim a mobilidade necessária para localizar essa estação em ponto geográfico desejado.

Graças a essa mobilidade decorreram as seguintes vanta
gens:

- a) Aumento do alcance da cobertura de vôo, ou seja, o tempo do ex
perimento, pois ao chegar ao limite de alcance da estação princi
pal em São José dos Campos, o balão pode ser rastreado por es
sa estação móvel. Dessa forma, vôos até mesmo superiores a 1000
km (Figura 2) podem ser acompanhados, principalmente quando são
feitos lançamentos em Cachoeira Paulista, na época em que o ven
to estratosférico sopra no sentido leste a oeste.

- b) Com a estação móvel, pode-se lançar o balão de uma localidade
situada mais para o interior do Brasil (Figura 3). Desse modo,
pelo afastamento conseguido do litoral, será possível lançar ba
lões em épocas de "turn around", ou seja, em época de transição
de ventos estratosféricos, quando eles variam de direção e sen
tido aleatoriamente. Os lançamentos efetuados nessa época do
ano oferecem a grande vantagem de maior tempo de ex
perimento, pois devido a essa inconstância do vento o balão permanece mais
tempo na região de alcance de uma dada estação de rastreo. As
sim, somente com uma estação móvel, seria possível conseguir
tempos de ex
perimento com balão superiores aos que se consegui
ria com a operação conjunta da estação principal de São José
dos Campos e da estação móvel em lançamentos realizados com o
vento estratosférico soprando de leste a oeste.

O alcance da estação móvel é menor que aquele das esta
ções fixas, devido essencialmente ao menor espaço físico disponível pa
ra instalação das antenas, o que redundaria obrigatoriamente em antenas da
estação móvel com menor dimensão, que as correspondentes às esta
ções fi
xas. Desse modo, o alcance desejado para ambas as estações fixas é de
500 km, enquanto que para a estação móvel 400 km seria considerado acei
tável.

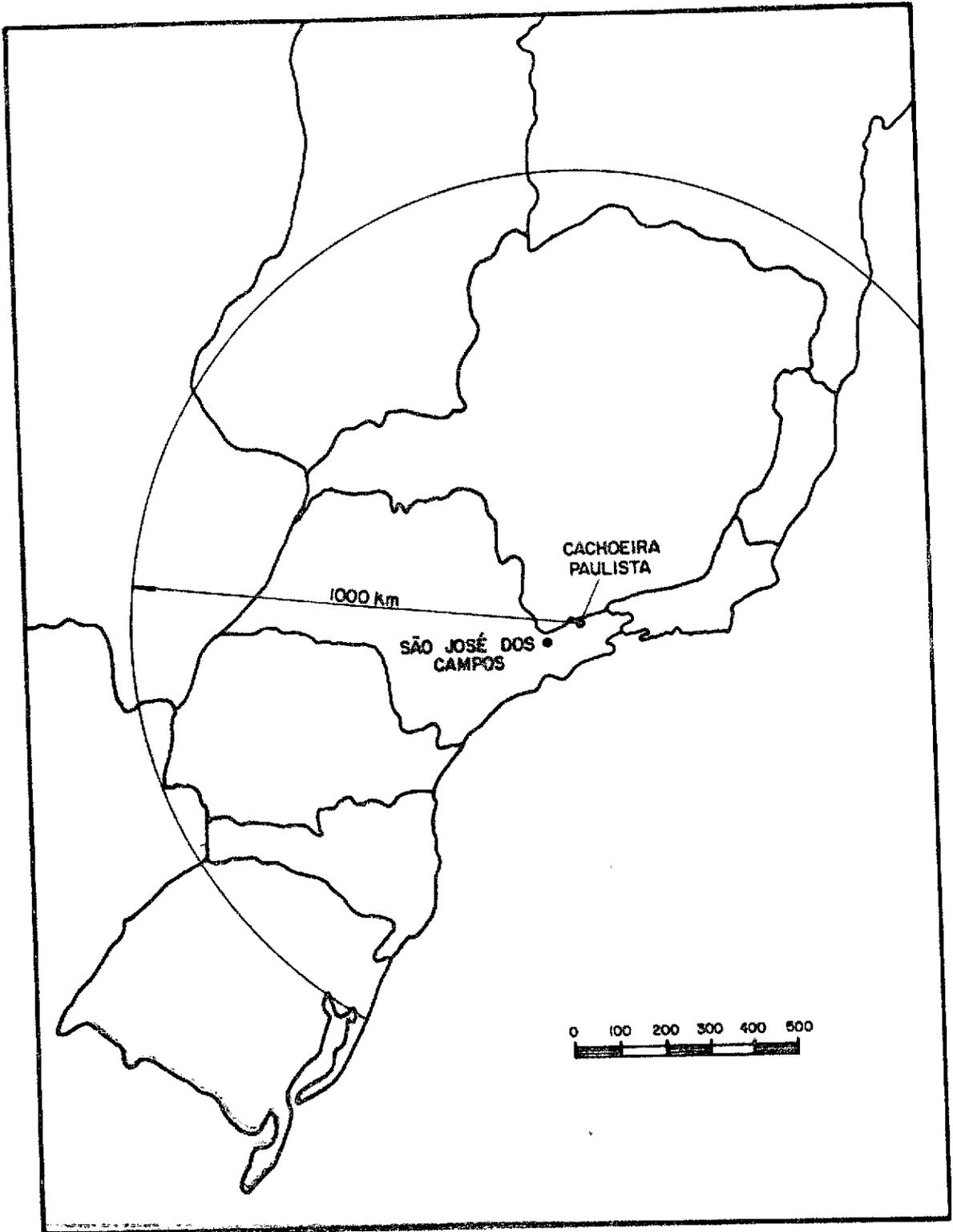


Fig. 2 - Alcance do sistema de rastreamento do INPE, com lançamento de balão em Cachoeira Paulista.



Fig. 3 - Operação da estação móvel em época de "turn around" com o alcance indicado, supondo o lançamento de balão em Brasília.

3 - SISTEMAS DE TELECOMANDO, TELEMETRIA E RASTREAMENTO DE BALÃO

As estações rastreadoras devem executar as seguintes funções principais:

- Localização da posição geográfica do balão em voo.
- Recepção do sinal de telemetria contendo dados ambientais e experimentais.
- Emissão de telecomandos para retificar séries de parâmetros, como por exemplo ângulos de observações dos instrumentos, níveis de potências dos transmissores de bordo, chaveamento de fontes de alimentação, etc.
- Emissão de telecomando para o encerramento do experimento.

3.1 - LOCALIZAÇÃO DA POSIÇÃO GEOGRÁFICA DO BALÃO EM VÔO

O princípio de funcionamento do sistema atual de localização do balão é bem simples, baseando-se na determinação dos ângulos de azimute e elevação em relação à estação rastreadora. Isso é feito pela antena parabólica, que procura maximizar o sinal em 1,68 GHz proveniente de balão.

Como a altura pode ser determinada a partir da pressão atmosférica nas imediações do balão, dado esse transmitido pelo enlace de telemetria, e conhecendo-se o azimute e elevação, pode-se estimar aproximadamente a posição geográfica do balão (Figura 4).

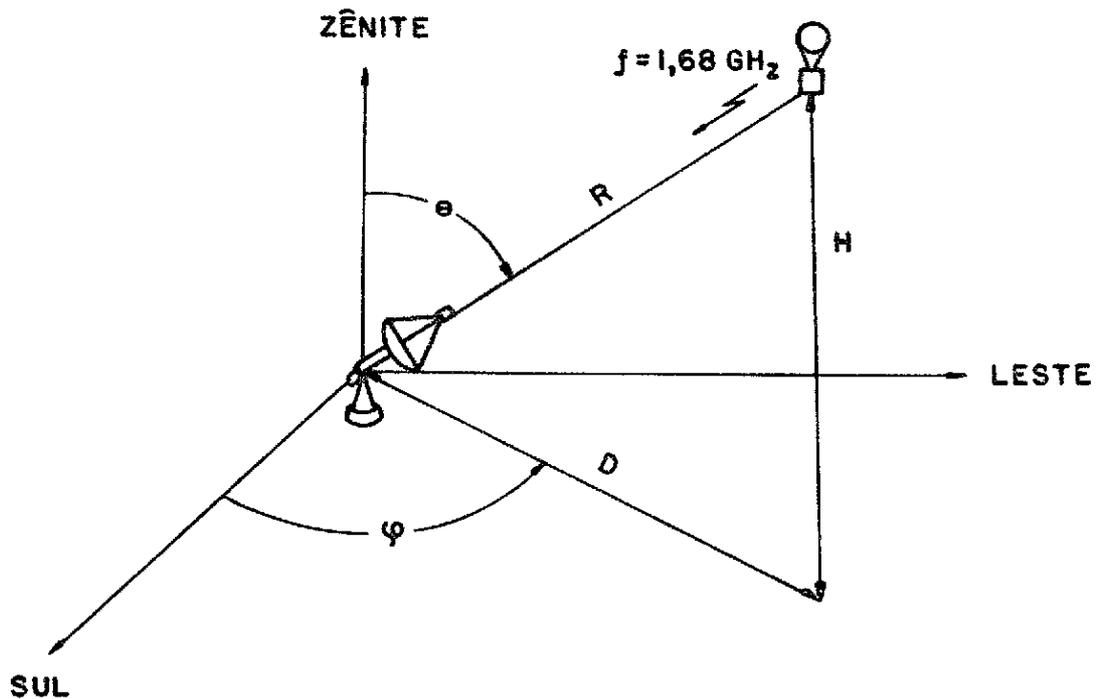


Fig. 4 - Determinação da posição geográfica do balão

A distância D , como pode ser visto na Figura 4, é calculada conforme a fórmula elementar:

$$D = H \tan \theta \quad (1)$$

Supondo-se que o posicionamento da parábola desvie de um ângulo $\Delta\theta$, a correspondente imprecisão na localização do balão será dada por:

$$\frac{\Delta D}{D} = \sec^2 \theta \Delta\theta \quad (2)$$

Assim, a imprecisão relativa cresce abruptamente para ângulos de visada aproximando-se do horizonte. Por exemplo, para $\theta = 85^\circ$ (5° do horizonte) e $D = 500$ km e $\Delta\theta = 1^\circ$, tem-se na localização ΔD da ordem de 100 km.

Devido a essa limitação drástica da precisão, cogita-se em implantar no futuro o Sistema Omega de Radionavegação. Esse sistema opera com oito estações permanentes de VLF espalhadas em todo o globo terrestre, oferecendo grande precisão na localização de aeronaves, além da grande vantagem de cobrir totalmente o globo terrestre.

Em princípio, caso a estação rastreadora possa receber o sinal que contém informações do Sistema Omega, transmitido pelo balão, pode-se sempre localizar este último com muita precisão, independente de sua posição.

As antenas parabólicas destinadas ao rastreamento do balão não foram incluídas nesse projeto atual de antenas para telecomandos e telemetria, uma vez que se decidiu a favor da aquisição dessas antenas, sendo sua escolha praticamente decidida pela oferta do mercado.

3.2 - SISTEMA DE TELEMETRIA EM 238,5 MHz

Séries de dados digitais provenientes de instrumentos de medições, assim como dos sensores ambientais, são multiplexados e depois modulados na frequência central em 238,5 MHz, após o que o sinal é transmitido pelo monopolo a bordo do balão.

O sinal de telemetria é recebido pela antena helicoidal, que limita a perda de polarização a apenas 3 dB, e é demodulado pelo receptor. Em seguida, o sinal digital recuperado, contendo os dados científicos e ambientais, é gravado na fita magnética.

3.2.1 - CÁLCULO DE ENLACE DE TELEMETRIA

Foi incluído neste trabalho, de modo resumido, o cálculo de enlace de telemetria para o dimensionamento dos ganhos das antenas. Detalhes a respeito desse cálculo de enlace para telemetria, assim como para os dois enlaces de telecomandos, podem ser encontrados no relatório específico em preparação (Koshima, b).

Cabe observar que foi colocado o valor de referência de 13 dB_i para o ganho das antenas de telemetria, com o intuito de obter um valor para a relação sinal-ruído. Determinada a relação sinal-ruído para esse caso, os ganhos das antenas podem ser obtidos simplesmente alterando-se o valor de ganho de 13 dB_i para outro valor que assegure a dada relação sinal-ruído.

1) Potência do sinal no reforçador ("booster")

O nível de potência do sinal na entrada do reforçador foi calculado, resultando -120,8 dB W. Na Tabela 1 estão indicados todos os parâmetros considerados para o cálculo de enlace de telemetria.

TABELA 1

BALANÇO DE PERDAS E GANHOS NO ENLACE DE TELEMETRIA

	NOTAÇÃO	TERMOS POSITIVOS	TERMOS NEGATIVOS
Potência transmitida (3 watts)	P_T	4,7 dBW	
Ganho de antena transmissora	G_T	1,5 dB _i	
Ganho de referência da antena receptora	G_R	13,0 dB _i	
Atenuação no espaço livre (R = 500 km)			134,0 dB
Perda de polarização	L_{pol}		3 dB
Perda de apontamento	L_{pont}		1 dB
Perdas na transmissão	L_T		1 dB
Perdas na recepção	L_R		1 dB
Perda adicional de propagação	L_{prop}		-
TOTAIS		19,2 dB	-140,0
Sinal no reforçador		-120,8 dBW	

2) Cálculo da potência de ruído

A temperatura de ruído da antena, incluindo os efeitos das perdas de transmissão e da antena, foi calculada resultando em $T_a' = 531^{\circ}\text{K}$, enquanto a temperatura de ruído do reforçador de sinal, por sua vez, resultou em $T_R = 300^{\circ}\text{K}$ (Koshima, b).

A faixa de FI do receptor RF é 300 KHz; portanto, aplicando-se $P_N = K(T_a' + T_R) \cdot 1,2 \text{ BFI}$ tem-se a potência de ruído.

$$P_N = -143,8 \text{ dBW}$$

3) Relação sinal ruído antes da demodulação

Como $P_R = -120,8 \text{ dBW}$ e $P_N = -143,8$, obtêm-se

$$10 \text{ Log } \frac{S}{N} = 23,0 \text{ dB}$$

Com a relação sinal-ruído de 23,0 dB, o sistema opera com folga de 10 dB em relação ao limiar prático adotado para demodulação FM, exigindo o mínimo de 13 dB para relação sinal-ruído. Isto considerando-se 13 dB para o ganho da antena receptora, e 3W para a potência transmitida.

3.3 - SISTEMA DE TELECOMANDO CIENTÍFICO EM 460 MHz

O sinal de telecomando em 460 MHz serve para transmitir, a partir das estações de rastreio, comandos que vão alterar diversos estados de equipamentos e de instrumentos de medição a bordo do balão.

A transmissão é feita de uma dada estação rastreadora em polarização circular, enquanto a recepção do sinal pelo balão é feita pelo monopolo de $\lambda/2$.

3.3.1 - CÁLCULO DE ENLACE DE TELECOMANDO CIENTÍFICO

1) Potência do sinal no receptor

A Tabela 2 apresenta o balanço de perdas e ganhos do enlace de telecomando científico, resultando em -129,8 dBW para a potência do sinal na entrada do receptor.

TABELA 2

BALANÇO DE PERDAS E GANHOS DO ENLACE DE TELECOMANDO CIENTÍFICO

	NOTAÇÃO	TERMOS POSITIVOS	TERMOS NEGATIVOS
Potência transmitida (8W)	P_T	9 dBW	
Ganho da antena transmissora	G_T	14 dBi	
Ganho da antena receptora	G_R	1,5 dBi	
Atenuação no espaço livre (R = 500 km)	A		139,7 dB
Perda de polarização	L_{pol}		3 dB
Perda de apontamento	L_{apont}		1 dB
Perdas de transmissão	L_T		4 dB
Perdas na recepção	L_R		1 dB
Perda adicional de propagação	L_{prop}		-
TOTAIS		+24,5 dBW	-148,7 dBW
Sinal no receptor			-124,8 dBW

2) Cálculo da potência de ruído

A temperatura de ruído calculada é $T_a' = 230,5^{\circ} K$, enquanto a temperatura equivalente de ruído do receptor $T_R = 234,6^{\circ} K$ (Koshima, b).

A faixa de ruído do receptor RF é 15,6 KHz; portanto, aplicando-se $P_N = K(T_a' + T_R) \cdot B_N$, obtêm-se a potência de ruído.

$$P_N = -160 \text{ dBW}$$

2) Relação sinal-ruído antes da demodulação

Conhecendo-se $P_N = -160 \text{ dB}$ e $P_R = -124,2 \text{ dB}$, tem-se:

$$10 \text{ Log } \frac{S}{N} = 35,8 \text{ dB}$$

3.4 - SISTEMA DE TELECOMANDO OPERACIONAL EM 126,8 MHz

O sistema de telecomando operacional existe somente para acionar um dispositivo que desconecta, do balão, a carga útil para possibilitar o resgate desta, após encerrado o experimento.

Esse mesmo comando pode ser acionado também pelo telecomando científico; porém, a existência dessa redundância aumenta a confiabilidade do sistema, pois, em caso da falha do sistema de telecomando científico, a carga pode ser recuperada, acionando-se o telecomando operacional.

A transmissão é feita em polarização vertical, enquanto a antena receptora no balão é monopolo de $\lambda/2$.

3.4.1 - CÁLCULO DO ENLACE DE TELECOMANDO OPERACIONAL EM 126,8 MHz

1) Potência do sinal no reforçador ("booster")

A Tabela 3 apresenta o balanço de perdas e ganhos do enlace de telecomando operacional, resultando em -125,0 dBW para a potência do sinal na entrada do reforçador.

TABELA 3

BALANÇO DE PERDAS E GANHOS DO ENLACE DE TELECOMANDO OPERACIONAL

	NOTAÇÃO	TERMOS POSITIVOS	TERMOS NEGATIVOS
Potência transmitida (4W)	P_T	6 dB	
Ganho da antena transmissora	G_T	10 dB	
Ganho da antena receptora	G_R	1,5 dBi	
Perdas no espaço livre (R = 500 km)	A		128,5 dB
Perda de polarização	L_{pol}		3 dB
Perda de apontamento	L_{apont}		1 dB
Perdas na transmissão	L_T		4 dB
Perdas na recepção	L_R		1 dB
Perda adicional de propagação	L_{prop}		5 dB
TOTALS		17,5	-142,5
Sinal no reforçador	P_R		-125,0 dBW

2) Cálculo da potência de ruído

A temperatura de ruído da antena $\bar{T}_a' = 1948^{\circ}\text{K}$, ao passo que a temperatura equivalente de ruído do reforçador ("booster") $\bar{T}_R = 300^{\circ}\text{K}$ (Koshima, b); portanto, a potência de ruído \bar{P}_N é:

$$\bar{P}_N = -148,8 \text{ dBW}$$

3) Relação sinal-ruído antes da demodulação

Como $P_R = 125,0 \text{ dBW}$ e $P_N = -148,8 \text{ dBW}$, tem-se:

$$10 \text{ Log } \frac{S}{N} = 23,8 \text{ dBW}$$

4 - PROJETO DE ANTENAS PARA ESTAÇÃO MÓVEL

Esse projeto pode ser subdividido nas seguintes partes:

- Projeto da antena de telecomando operacional em 126,8 MHz.
- Projeto da antena de telemetria em 240 MHz.
- Projeto da antena de telecomando em 460 MHz.
- Definição da disposição física ("lay out") de todas as antenas, que incluem a parábola de rastreamento em 1,68 GHz.

4.1 - REQUISITOS EXISTENTES

A série de requisitos, abaixo mencionados, aumentou consideravelmente a complexidade desse projeto.

- a) Todas as antenas devem ter possibilidade de apontar para o balão em qualquer instante de vôo; portanto, sempre deve ser possível posicionar qualquer das antenas em qualquer direção.
- b) Os bloqueios recíprocos entre as antenas devem ser desprezíveis.
- c) Devem ser previstos espaços úteis, tanto para o operador da antena de telecomando operacional, como para o pessoal de manutenção, garantindo-se um trabalho com segurança.
- d) Todas as antenas devem ter dimensões tais, para que possam ser transportadas no interior da cabine da estação móvel, ou presas ao teto da mesma. Especialmente nesse projeto, devido à mobilidade requerida pela estação, as facilidades quanto ao transporte, armazenamento e montagem são quesitos bastante importantes.
- e) A parábola rastreadora adquirida, que mede 1,0 m de diâmetro, deve também ser instalada sobre o teto da cabine.

- f) As antenas devem satisfazer às condições mínimas de ganhos, dentro das possibilidades oferecidas. Esses ganhos devem ser os máximos possíveis, aumentando assim as margens de sinal-ruído dos enlaces de comunicações, e trazendo série de benefícios como: diminuições das potências de operação dos transmissores, viabilidade de utilização dos componentes com maiores perdas (por exemplo cabos coaxiais e filtros), receptores mais modestos, e principalmente, menor imunidade às perturbações causadas pelos ruídos e pelo aumento das perdas de propagação.
- g) Antena de Telecomando Operacional
- Polarização vertical
 - Deve operar no pedestal manual, pois só entra em funcionamento no fim do voo, não justificando um pedestal automático.
 - Ganho da antena >10 dB, conforme cálculo de enlace, apresentado na Seção 3.4.1, para garantir a relação sinal-ruído de, no mínimo, 23,8 dB, considerando-se o alcance da estação de 500 km.
- h) Antena de Telecomando científico
- Polarização circular com orientação arbitrária.
 - Os telecomandos devem ser emitidos sempre que necessários. Isso implica que essa antena de telecomando deve estar apontada para o balão durante todo o tempo de voo.
 - Ganho da antena >14 dB, conforme o cálculo de enlace, apresentado na Seção 3.3.1, para garantir a relação sinal-ruído de, no mínimo, 35,8 dB, considerando-se o alcance da estação de 500 km.
- i) Antena de Telemetria
- Polarização circular com orientação arbitrária.
 - A antena de telemetria deve funcionar ininterruptamente, o que torna aconselhável sua montagem no pedestal automático, por razões operacionais.

- Ganho da antena >13 dB, conforme cálculo de enlace apresentado na Seção 3.2.1, para garantir a relação sinal-ruído de, no mínimo, 23,0 dB, considerando-se o alcance da estação de 500 km.

4.2 - SOLUÇÃO GLOBAL

As severas restrições geométricas originadas pelo reduzido espaço disponível às instalações das antenas, juntamente com a necessidade de maximizar os ganhos das mesmas, impõem uma solução global para esse projeto. Dessa forma, as antenas não podem ser projetadas isoladamente, mas sim considerando o funcionamento de todo o conjunto, pois torna-se necessário encontrar compromissos aceitáveis entre suas dimensões geométricas e seus ganhos.

Os tipos de antenas foram escolhidos sem grandes problemas, sendo definidos por:

- Antena Yagi para telecomando operacional em 126,8 MHz.
- Antenas helicoidais para telemetria em 238,5 MHz, e telecomando científico em 460 MHz.

Fez-se a seleção da antena Yagi levando-se em conta que esse tipo de antena, nessa faixa de VHF, apresenta maior ganho, além da simplicidade de construção e também da dimensão relativamente reduzida.

Quanto às escolhas das antenas helicoidais, realmente não se teve dúvida, pois, para a polarização circular na faixa de UHF, a antena helicoidal foi preferida pelas seguintes razões: ganho razoavelmente alto, simplicidade de construção, dimensão adequada e faixa bastante larga de operação.

Definidos os tipos de antenas, resta dimensioná-las. Os mínimos ganhos exigidos pelas antenas irão impor comprimentos mínimos às antenas discriminados a seguir:

- a) O programa de otimização (Koshima, 1976) conduz a uma antena Yagi otimizada, com 1,68 m de comprimento e diretividade de 10,9 dB. Considerando-se a perda da antena entre 0,5 a 1 dB, ela terá ganho da ordem de 10 dB.
- b) O ganho mínimo de 13 dB imposto à antena de telemetria requer comprimento mínimo de 1,90 m, considerando-se apenas as espiras helicoidais, ao projetar a antena helicoidal com $C = 1,0 \lambda$ (Jasik, 1961).
- c) O ganho mínimo de 14 dB imposto à antena de telecomando científico requer comprimento mínimo de 1,20 m, considerando-se apenas as espiras helicoidais, caso se projete a antena helicoidal com $C = 1,0 \lambda$ (Jasik, 1961).

Os comprimentos das antenas reais precisam ser entre 20 a 30 cm mais longos que os valores acima mencionados. Assim sendo, o problema consiste em acomodar no teto da cabine móvel a parábola de 1 m de diâmetro e mais três antenas com comprimentos mínimos de 1,90 m (telecomando operacional), 2,20 m (telemetria) e 1,50 m (telecomando científico), sendo que os requisitos (a) e (b) devem ser obedecidos. O problema não é nada comum e, por isto mesmo, foi preciso encontrar uma solução original.

Para se chegar à solução, baseou-se nos seguintes argumentos:

- i) As antenas de telecomando científico e operacional devem operar no mesmo pedestal automático. Com essa providência, a antena de telecomando ficará sempre orientada para a direção do balão, devido ao princípio de funcionamento da antena de telemetria.

- ii) O pedestal automático anterior deve, no entanto, ser o mais simples possível, não podendo ultrapassar um peso de 80 kg, pois, terminado o experimento com o balão científico, é preciso guardá-lo no interior da cabine da estação móvel.
- iii) O telecomando operacional de 126,8 MHz tem caráter alternativo, ou seja, a mesma tarefa é feita pelo telecomando científico em 460 MHz; desse modo, esse sistema de telecomando operacional existe mais por precaução contra eventuais falhas do outro sistema. Decidiu-se, assim, que a antena Yagi tivesse o menor comprimento possível, assegurando-se o ganho de 10 dB. A limitação do comprimento da antena Yagi em 1,68 m irá permitir maior comprimento para antenas de telemetria e telecomando.

Devido às razões acima mencionadas, foi possível explorar a idéia da utilização da antena bi-helicoidal, servindo simultaneamente como transmissora de telecomando e como receptora de telemetria.

Como a antena bi-helicoidal, no que se refere às dimensões, é exatamente idêntica a uma antena helicoidal isolada, essa justaposição de duas antenas numa só possibilitou enorme economia em relação ao espaço ocupado, simplificando o pedestal automático além de facilitar o aspecto operacional.

4.3 - PROJETO DA ANTENA YAGI OTIMIZADA

4.3.1 - OBTENÇÃO DA CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA

A configuração da antena Yagi otimizada foi definida a partir das duas condições: a) Ganho >10 dB e b) Menor comprimento possível.

O programa computacional desenvolvido para a otimização dos espaçamentos e comprimentos dos elementos de uma antena Yagi

(Koshima, 1976) mostrou enorme utilidade neste projeto. Isto porque com o programa existente, pode ser obtida uma antena Yagi otimizada (Tabela 4), que possui a máxima diretividade possível para o comprimento longitudinal final de 1,68 m.

TABELA 4

CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA COM 4 ELEMENTOS

Elementos	1	2	3	4
Abcissas (m)	0,000	0,541	1,027	1,682
Comprimentos (m)	1,188	1,158	1,066	1,067

Diâmetro dos elementos: 5/8"

Características da antena

Frequência central: 126,8 MHz

Diretividade: 10,9 dB

Relação frente-costa: 9,1 dB.

Maiores detalhes sobre esse projeto da antena Yagi otimizada podem ser vistos em Koshima (1981).

4.3.2 - CARACTERÍSTICAS DA ANTENA OTIMIZADA

a) Diagramas de Irradiação

As Figuras 5, 6 e 7 mostram os diagramas de irradiação tanto teóricos como medidos no plano H para frequências de 123,7, 125,9 e 129,4 MHz, respectivamente.

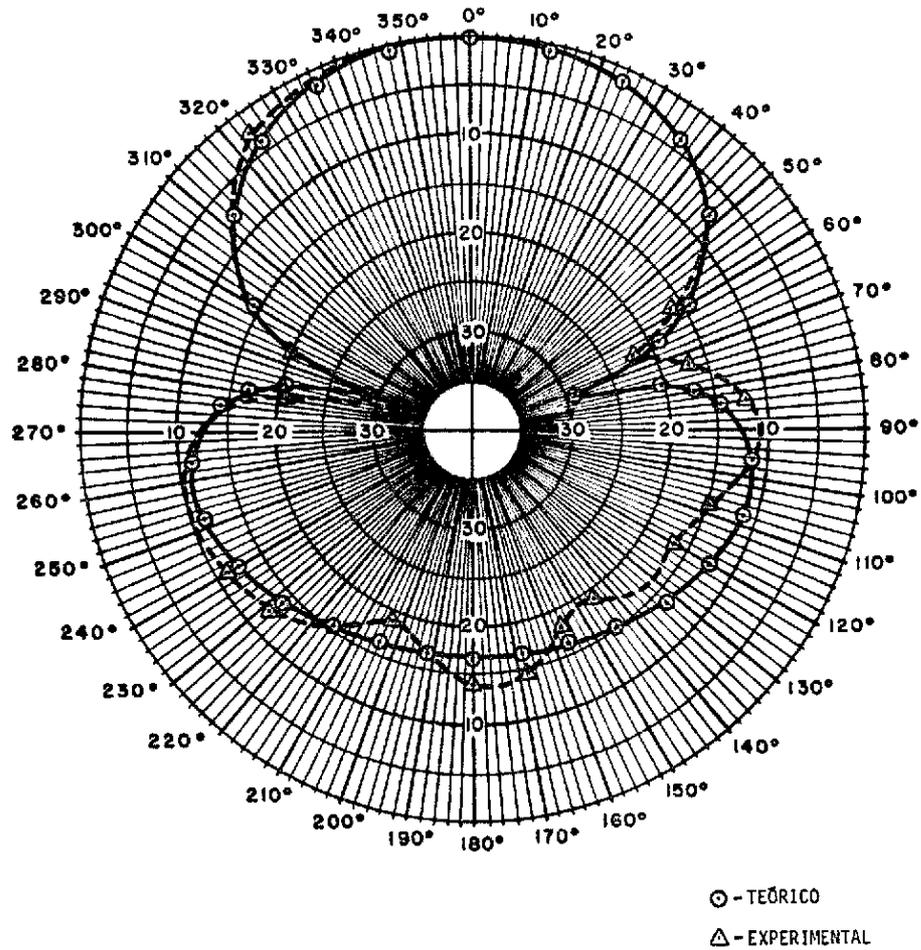


Fig. 5 - Diagrama de radiação da antena Yagi de 4 elementos em 123,7 MHz.

FONTE: Koshima (1981), p. 21.

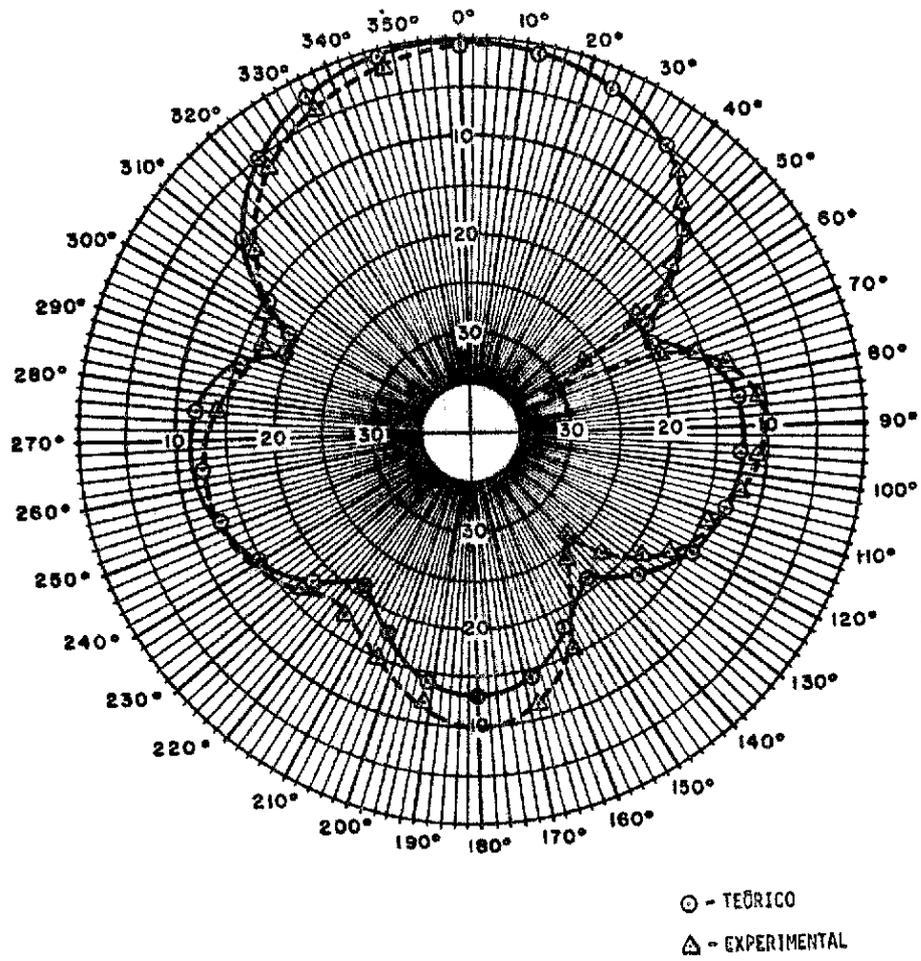


Fig. 6 - Diagrama de radiação da antena Yagi de 4 elementos em 125,9 MHz.

FONTE: Koshima (1981), p. 22.

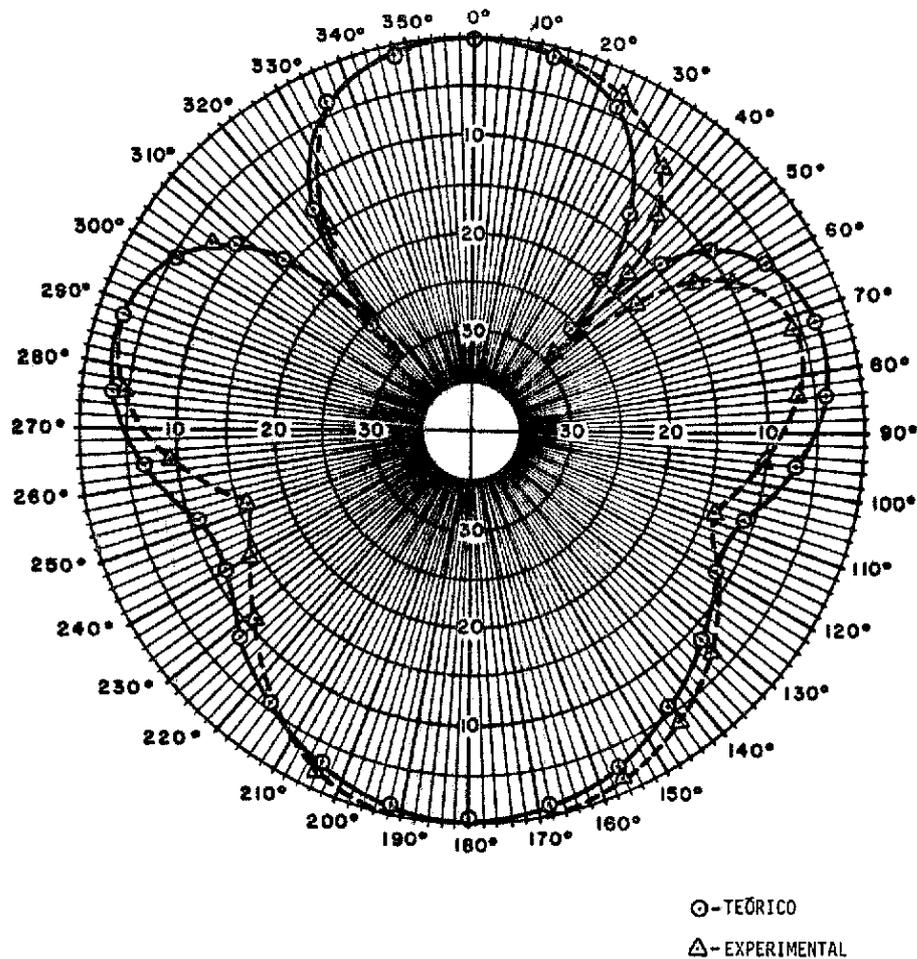


Fig. 7 - Diagrama de radiação da antena Yagi em 129,4 MHz.

FONTE: Koshima (1981), p. 23.

As curvas experimentais aproximam-se bem das curvas teóricas, constatando-se a viabilidade do programa de otimização da antena Yagi para substituir com razoável precisão as medidas sempre demoradas dos diagramas de irradiação dessas antenas.

Nota-se nessas figuras que a característica dessa antena Yagi piora muito em 129,4 MHz com aumentos substanciais de lóbulos laterais e traseiros, enquanto em 123,7 MHz nota-se ligeiro achatamento do lóbulo principal, comprovando a tendência da diretividade teórica apresentada na Figura 8.

b) Diretividade

A diretividade teórica dessa antena na frequência central em 126,8 MHz é de 10,9 dB. Esse parâmetro porém varia muito com a frequência, como pode ser observado na Figura 8.

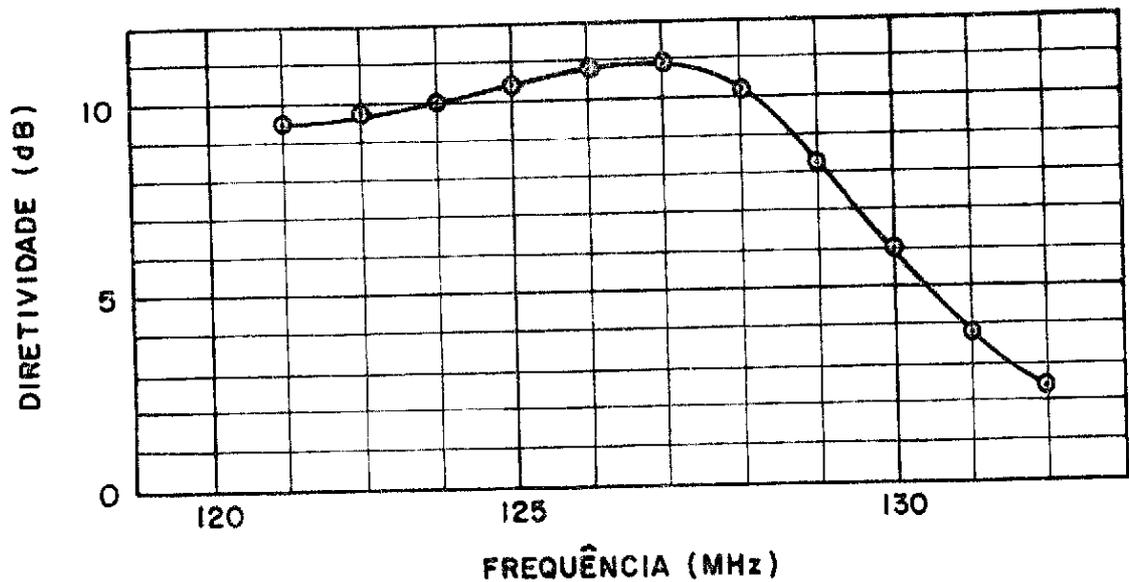


Fig. 8 - Comportamento da diretividade da antena Yagi otimizada com frequência.

FONTE: Koshima (1981), p. 8.

Uma consequência natural das antenas otimizadas é o seu estreitamento na faixa de operação, com característica comum de queda abrupta nas frequências acima da frequência central, e queda mais suave da diretividade com diminuição da frequência.

c) Impedância

Após o casamento da impedância conseguida com dipolo do brado e curto ajustável, foi feita a medição da impedância que apresenta a variação com frequência, conforme a Figura 9. Como pode ser observado nesta figura, a faixa de casamento é bastante estreita, com $SWR < 2$

para frequências entre 125 e 127 MHz aproximadamente. Isto é em parte devido ao "balun" do tipo "bazooka" empregado, que é de fácil construção, porém de faixa bem estreita, e em parte devido à própria característica bastante ressonante da antena Yagi otimizada.

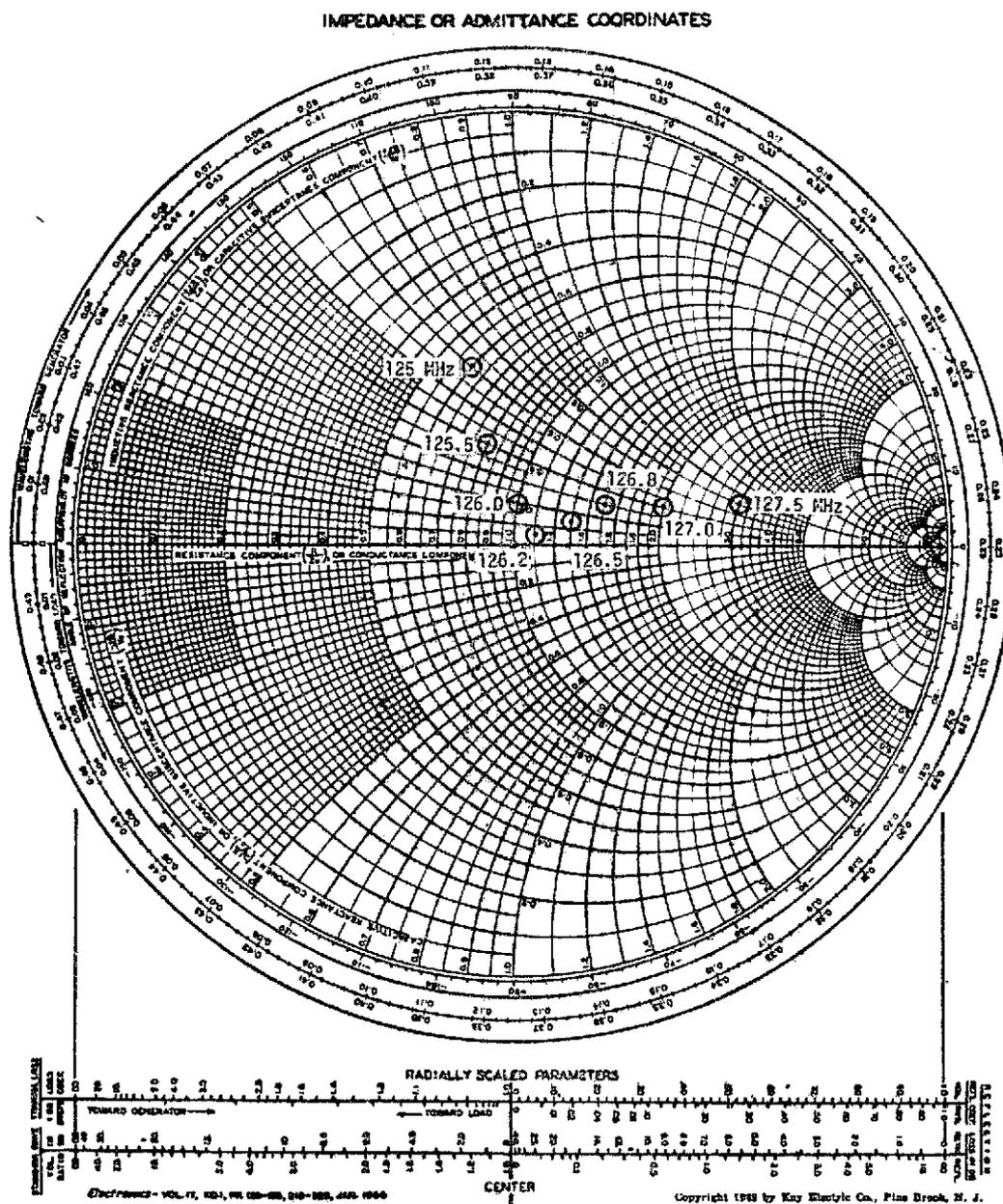


Fig. 9 - Comportamento em frequência da impedância da antena Yagi de 4 elementos após o casamento de impedância.

FORNE: Koshima (1981), p. 19.

4.4 - PROJETO DA ANTENA BI-HELICOIDAL

4.4.1 - CONCEPÇÃO DA ANTENA BI-HELICOIDAL

A idéia da antena bi-helicoidal surgiu devido a duas condições bastante complexas:

- a) Espaço físico extremamente exíguo para o campo de antenas de estação móvel.
- b) O conjunto formado pelas antenas de telemetria e telecomando científico deve ter menor momento de inércia e menor peso possível, minimizando assim os esforços aplicados aos redutores do pedestal automático.

Foi descartada a solução convencional representada por uma montagem das duas antenas helicoidais, com eixos longitudinais afastados de uma certa distância, em virtude de esse conjunto de antenas não satisfazer ao item b) acima. Assim foi inevitável tentar uma solução mais complexa. Ao invés de montar as antenas afastadas de certa distância, foram justapostas as duas antenas de acordo com um mesmo eixo, eliminando-se em consequência um plano de terra e uma estrutura de sustentação da espira helicoidal.

Dessa forma, do ponto de vista mecânico, as duas antenas ficaram reduzidas a apenas uma, pois em descrição simplificada a antena concebida não é senão duas hélices enroladas em torno de um mesmo eixo longitudinal, montado sobre um plano de terra comum. Daí a denominação bi-helicoidal dada à antena.

A característica desse tipo de antena era completamente desconhecida; inclusive, tudo levava a crer que não funcionaria, devido ao forte acoplamento existente entre as duas espiras helicoidais enroladas tão próximas uma da outra.

Temia-se, em primeiro lugar, que houvesse modificações sensíveis de distribuição de correntes nas duas espiras, resultando em diagramas de irradiações completamente deformadas e inúteis para o projeto.

Em segundo lugar, pelo fato da antena de telecomando ser transmissora com potência relativamente elevada (9 dBW), e a antena de telemetria ser de recepção com sinal relativamente baixo (-120,8 dBW), receava-se que, devido ao acoplamento inevitável entre as duas espiras helicoidais, o sinal de telecomando pudesse perturbar o sinal de telemetria.

Para verificar a viabilidade desse tipo de antena, construiu-se um protótipo e fizeram-se várias medições, obtendo-se conclusões surpreendentes:

- a) Os diagramas de irradiação medidos foram plenamente satisfatórios, tanto para a faixa de telemetria como para a de telecomando. Realmente foram observadas modificações já esperadas em relação a duas antenas isoladas, notando-se estreitamento de faixas de operação da antena bi-helicoidal, além das diminuições das diretividades para a faixa de telecomando. No entanto, mesmo verificando-se esse empobrecimento, a antena bi-helicoidal possuía características direcionais excelentes, além das faixas de operação ainda bastante largas.
- b) De fato, o desacoplamento entre as duas antenas é insuficiente, sendo da ordem de 20 a 30 dB. No entanto, essa dificuldade foi contornada com o emprego do filtro helicoidal de três seções. A ação combinada deste filtro com o filtro do receptor RF de telemetria resultou numa seletividade suficiente para rejeitar completamente a interferência do sinal de telecomando.

Em suma, as medições efetuadas comprovaram a plena viabilidade técnica da antena bi-helicoidal. Desse modo, foi resolvido com

pletamente o problema das antenas de telecomando e telemetria, pois a antena bi-helicoidal é sem dúvida a solução ideal, pelos seguintes motivos:

- a) dimensão reduzida;
- b) custo baixo de fabricação;
- c) facilidade de montagem, transporte e armazenamento;
- d) peso e momento de inércia bastante reduzidos;
- e) ganhos próximos aos das antenas helicoidais isoladas;
- f) faixa de operação bastante larga em termos de diretividade e casamento de impedância.

Decidido pelo uso da antena bi-helicoidal, foi preciso definir o comprimento dessa antena. Limitou-se o comprimento em 2,10 m (considerando só as espiras), pela necessidade de transportar a antena no interior da cabine da estação móvel. Com este comprimento, os ganhos das antenas são maiores que os mínimos ganhos estipulados pelo projeto.

Maiores detalhes sobre o projeto encontram-se em Koshima (a).

4.4.2 - CARACTERÍSTICAS DA ANTENA BI-HELICOIDAL

1) Diagramas de irradiação

a) Faixa de telemetria

Os diagramas de irradiações das Figuras 10, 11 e 12, traçadas para as frequências de 211, 239 e 270 MHz, mostram as excelentes características direcionais da antena bi-helicoidal na faixa de telemetria.

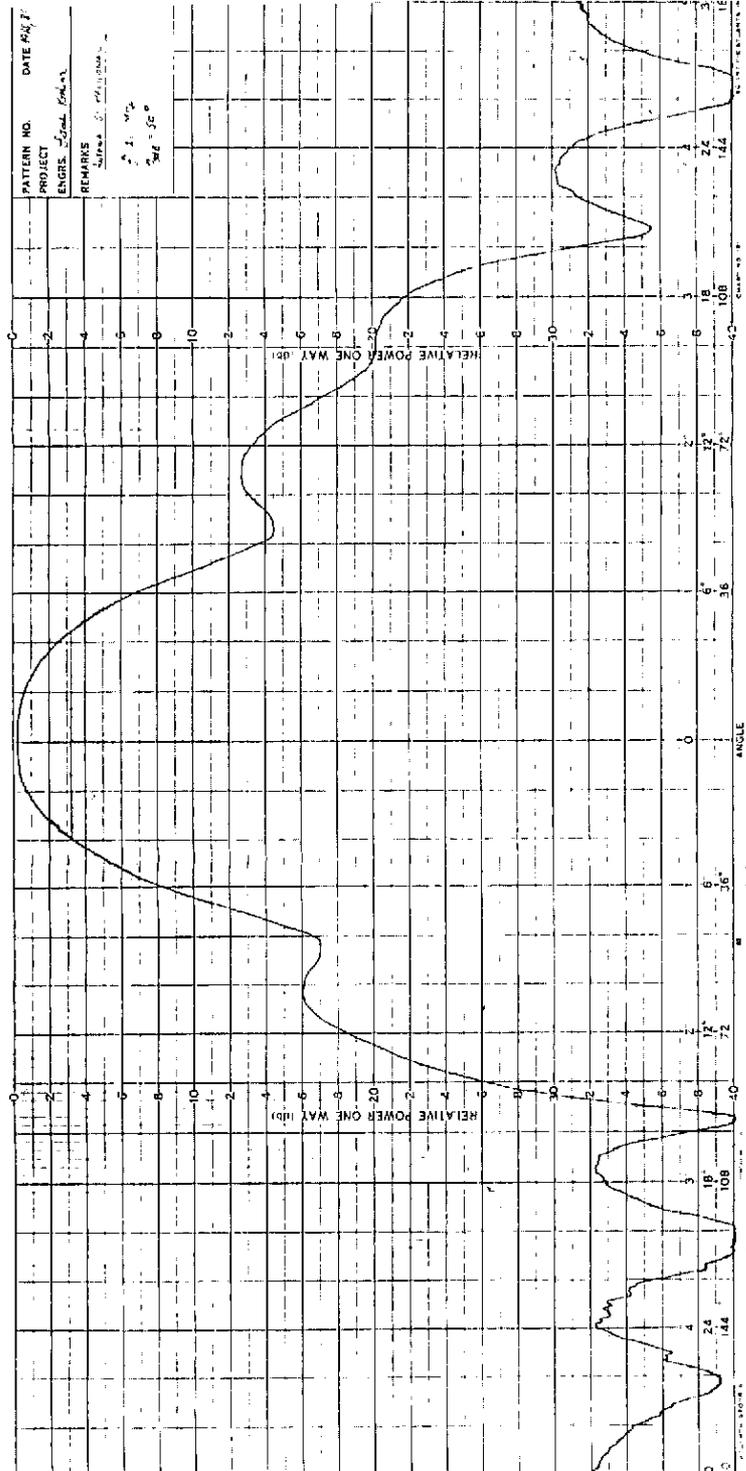


Fig. 10 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 211 MHz.

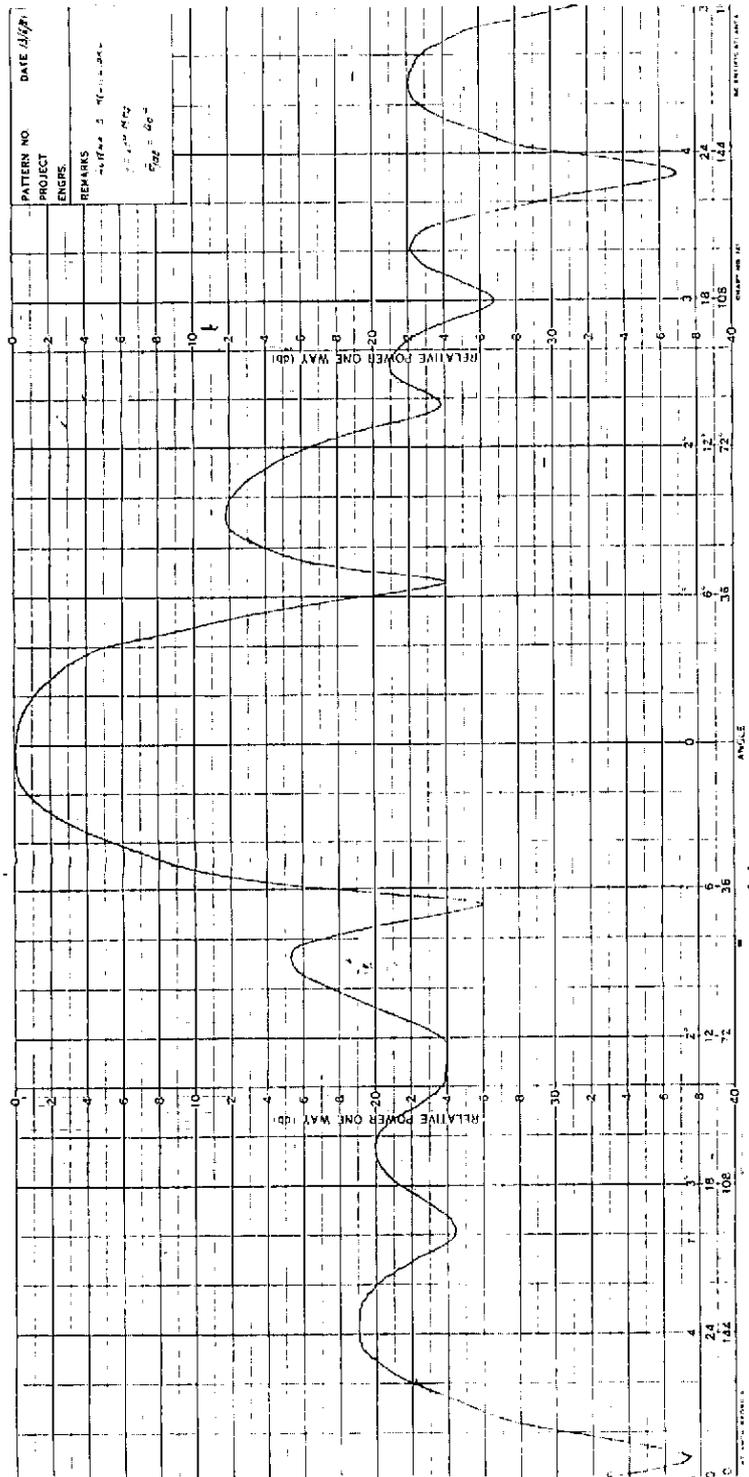


Fig. 11 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 239 MHz.

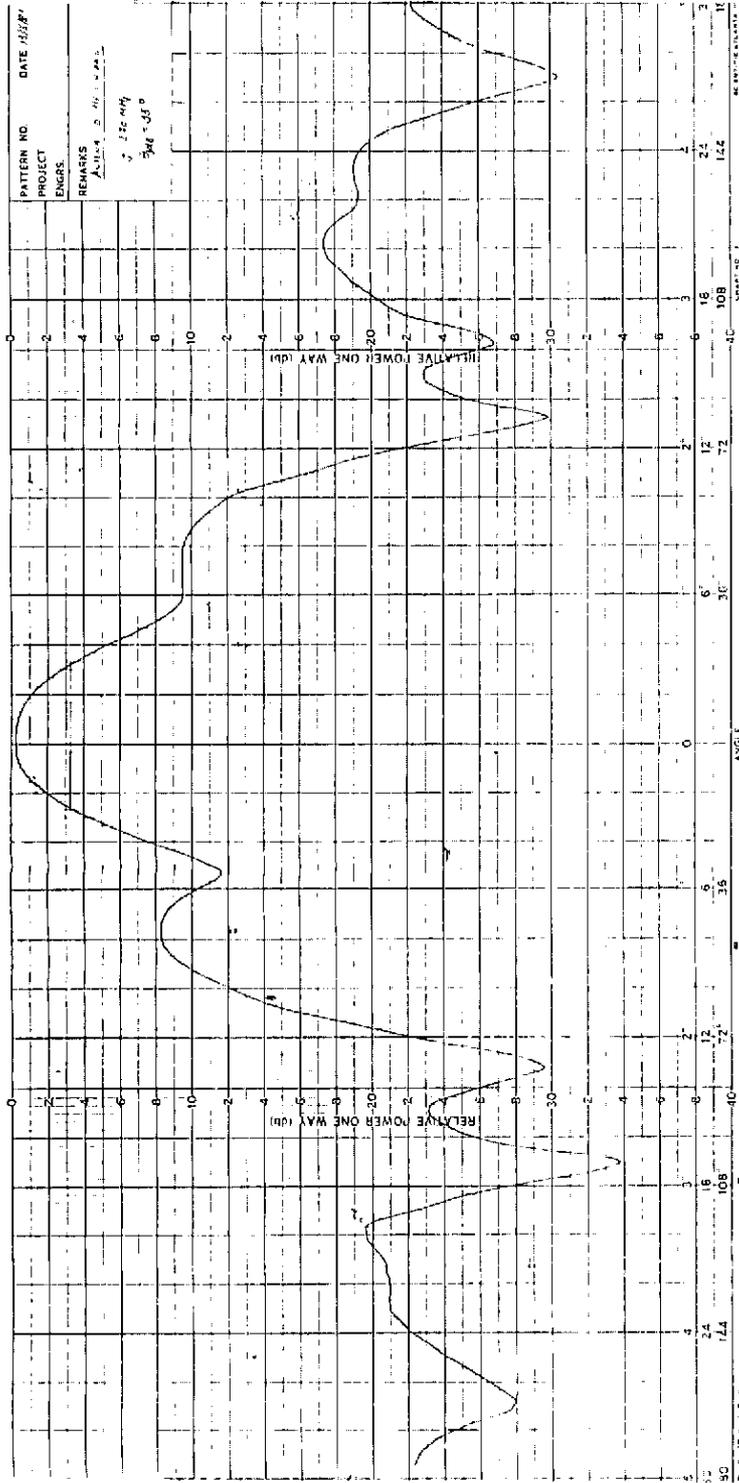


Fig. 12 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 270 MHz.

As tendências verificadas podem ser expressas pelo alargamento do feixe principal em frequências mais baixas, enquanto, com o aumento da frequência, ocorre um estreitamento do feixe principal ao mesmo tempo que aumenta o nível de lóbulo secundário. Em 280 MHz, os lóbulos secundários se igualam praticamente ao lóbulo principal, o que restringe o uso dessa antena até ao máximo de 270 MHz. Em frequências inferiores, pode-se eventualmente utilizar até mesmo frequências inferiores a 210 MHz, mas isto com perda de diretividade.

A título de comparação com as características da antena helicoidal isolada, foram calculados os ângulos de meia potência, segundo a Fórmula 3 (Kraus, 1950), e confrontados com ângulos de 3 dB medidos da antena bi-helicoidal.

$$\beta = \frac{52}{\frac{C}{\lambda} \left(\frac{nS}{\lambda}\right)^{1/2}} \text{ graus} \quad (3)$$

onde:

λ : comprimento de onda no espaço livre

S: passo da hélice $S = C \tan \alpha$

C: perímetro da circunferência da hélice

n: número de voltas da hélice.

A Tabela 5 mostra excelente concordância entre os ângulos de meia potência, calculados pela Fórmula 3, e os retirados dos diagramas de irradiação experimentais da antena bi-helicoidal.

TABELA 5

COMPARAÇÃO DOS ÂNGULOS DE MEIA POTÊNCIA DA ANTENA
BI-HELICOIDAL E HELICOIDAL ISOLADA

FREQUÊNCIA (MHz)	211	239	270
Ângulos de 3 dB Helicoidal isolada	49°	40°	34°
Ângulos de 3 dB Bi-helicoidal	50°	40°	35°

b) Faixa de telecomando

Os diagramas das Figuras 13, 14 e 15 foram traçados para frequências de 401, 460 e 520 MHz. Os ângulos de 3 dB, calculados conforme a Fórmula 3, e aqueles obtidos dos diagramas medidos foram confrontados na Tabela 6, indicando que, em frequências mais baixas os desvios são maiores, enquanto em frequências de 520 MHz os dois ângulos estão bem próximos.

A conclusão que se tira ao comparar as Tabelas 5 e 6 é que os diagramas de irradiação da antena de telemetria (correspondente à antena helicoidal externa) não sofreram influência da espira helicoidal interna, enquanto o mesmo não sucedeu com a antena de telecomando (correspondendo à espira helicoidal interna), fortemente afetada pela espira helicoidal externa.

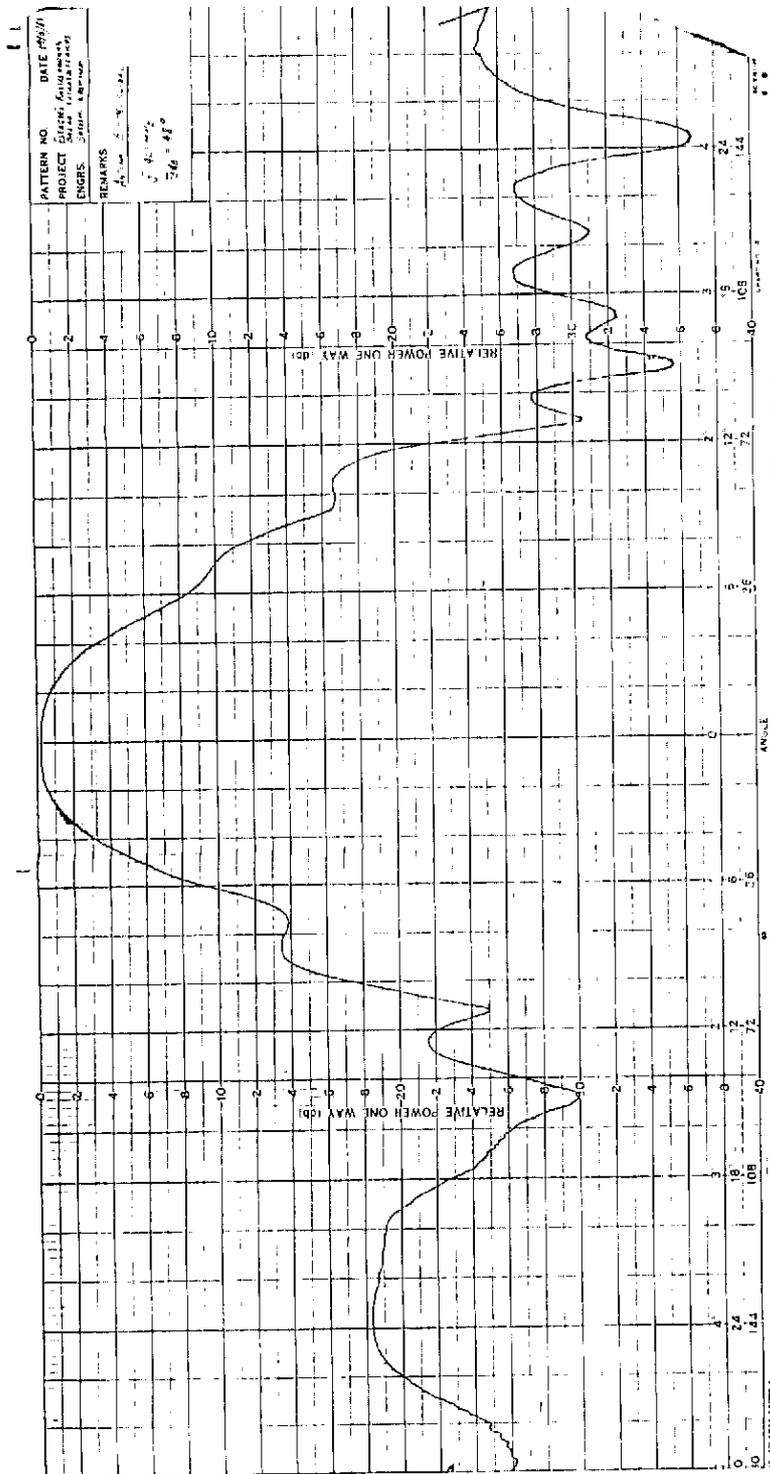


Fig. 13 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 401 MHz.

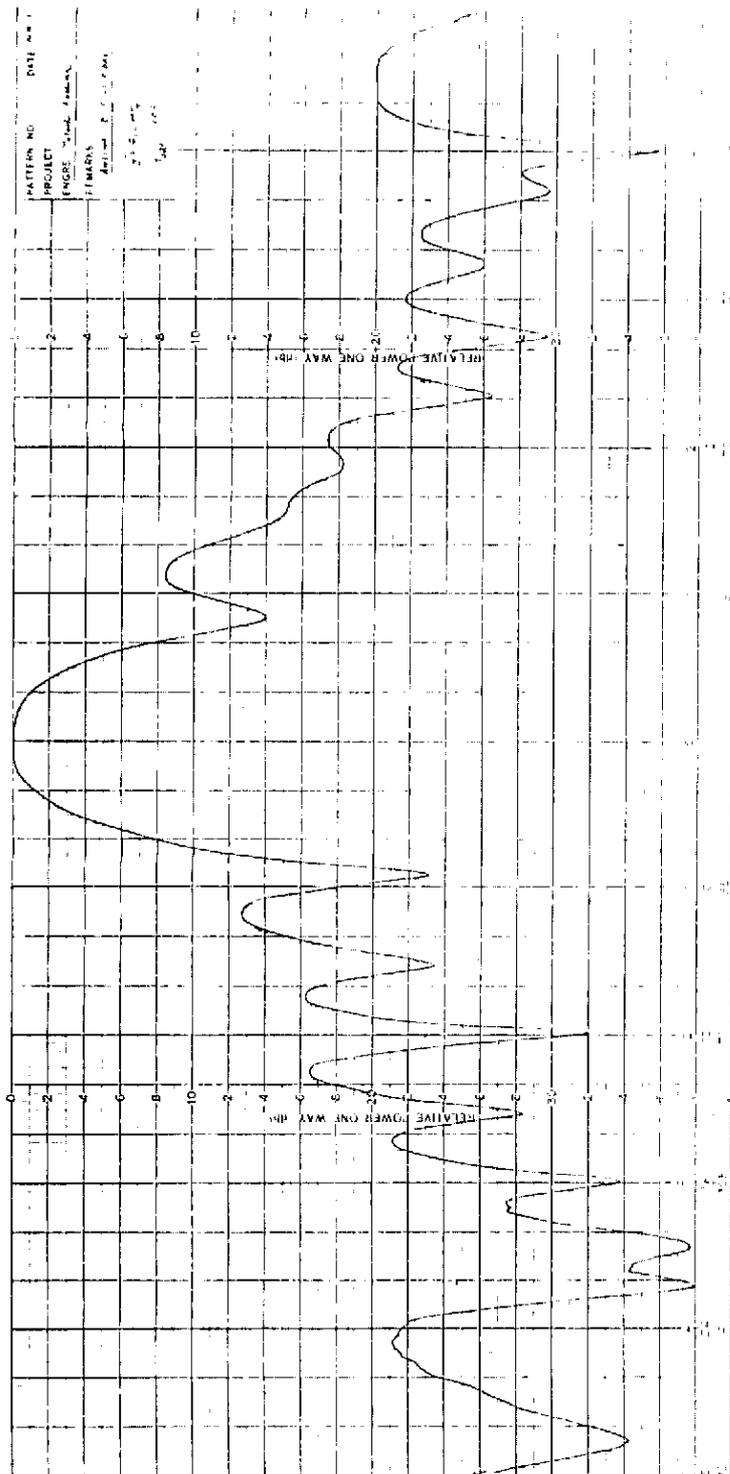


Fig. 14 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 460 MHz.

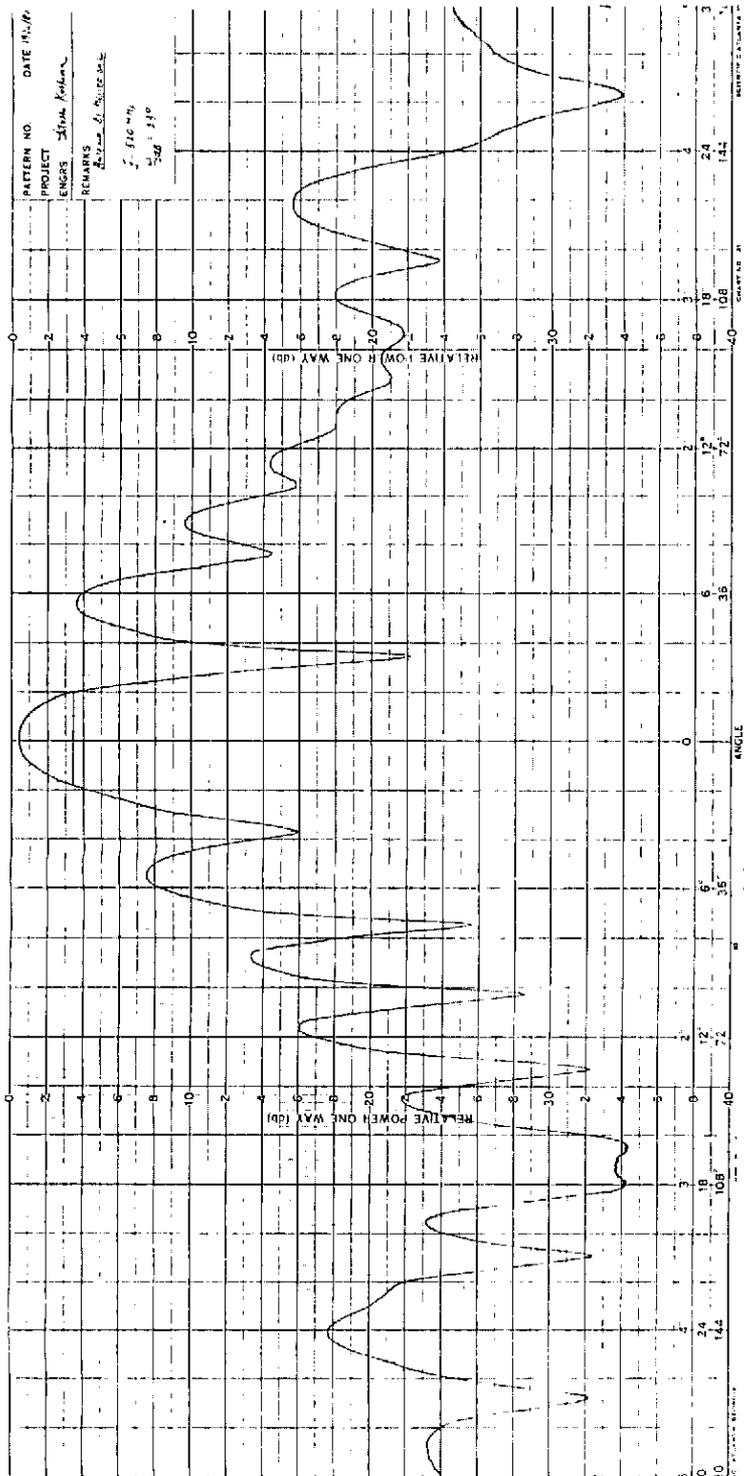


Fig. 15 - Diagrama de radiação da antena bi-helicoidal em 520 MHz.

TABELA 6

COMPARAÇÃO ENTRE ÂNGULOS DE MEIA POTÊNCIA DA ANTENA
BI-HELICOIDAL E DA HELICOIDAL ISOLADA

FREQUÊNCIA (MHz)	401	460	520
Ângulos de 3 dB Helicoidal isolada	35°	29°	24°
Angulos de 3 dB Bi-helicoidal	48°	35°	23°

2) Impedância

a) Antena de Telemetria

Após o casamento de impedância, obtiveram-se taxas de on da estacionária (SWR) inferiores a 1,5 entre as frequências de 166 a 254 MHz, uma faixa bastante razoável de 88 MHz. Resumindo:

SWR < 1,5 entre 166 a 254 MHz.

b) Antena de Telecomando

SWR < 1,5 entre 384 a 543 MHz.

3) Desacoplamento

Medições realizadas indicaram valores para o desacoplamento entre as antenas de telemetria e telecomando, apresentados na Tabela 7.

TABELA 7

DESACOPLAMENTO ENTRE ANTENAS DE TELEMETRIA E TELECOMANDO

FREQUÊNCIA (MHz)	200	240	300	400	460	500
DESACOPLAMENTO (dB)	16,9	22,1	11,0	26,1	31,6	27,8

4) Ganhos

a) Antena de Telemetria

Frequência (MHz)	210	240	270
Ganho medido (dB)	11,0	12,5	12,2

b) Antena de Telecomando

Frequência (MHz)	400	469	520
Ganho medido (dB)	14,2	17,6	15,9

O ganho foi medido, fazendo-se a comparação entre o sinal recebido pela antena bi-helicoidal e o correspondente sinal da antena logperiódica da Scientific Atlanta, cujo ganho nominal é 8 dB.

Devido a erros experimentais, tais como: imprecisões nas leituras do receptor, variação do ganho da antena logperiódica em torno do valor nominal, e imperfeições do campo de medições das antenas, estima-se que os desvios dos ganhos apresentados sejam no máximo 2 dB.

4.5 - DISPOSIÇÃO FÍSICA DAS ANTENAS ("LAYOUT")

Dimensionadas as antenas, foi necessário encontrar a melhor disposição física das mesmas sobre o teto da cabine na estação móvel. Desse modo, decidiu-se pela configuração das antenas apresentadas no desenho esquemático da Figura 16, pelas seguintes razões:

- a) Posicionando-se as antenas bi-helicoidal e a parabólica nas extremidades do teto da cabine, conseguiu-se as seguintes vantagens:
 - O espaço do teto reservado para a livre movimentação da antena bi-helicoidal reduz-se a quase metade, sobrando, consequentemente, mais espaço para a instalação da antena Yagi e também para a movimentação do pessoal.
 - As antenas parabólica e bi-helicoidal vão operar mais desobstruídas.

- b) O conjunto pedestal manual mais a antena Yagi podem ser deslocados sem grandes dificuldades. Esta antena será instalada ou na base 1 ou na base 2 (ver Figura 16), dependendo da trajetória do balão. Com isto, essa antena poderá cobrir todo o céu, o que não ocorreria caso operasse numa base fixa, devido às obstruções causadas pela parábola e também pela antena bi-helicoidal.

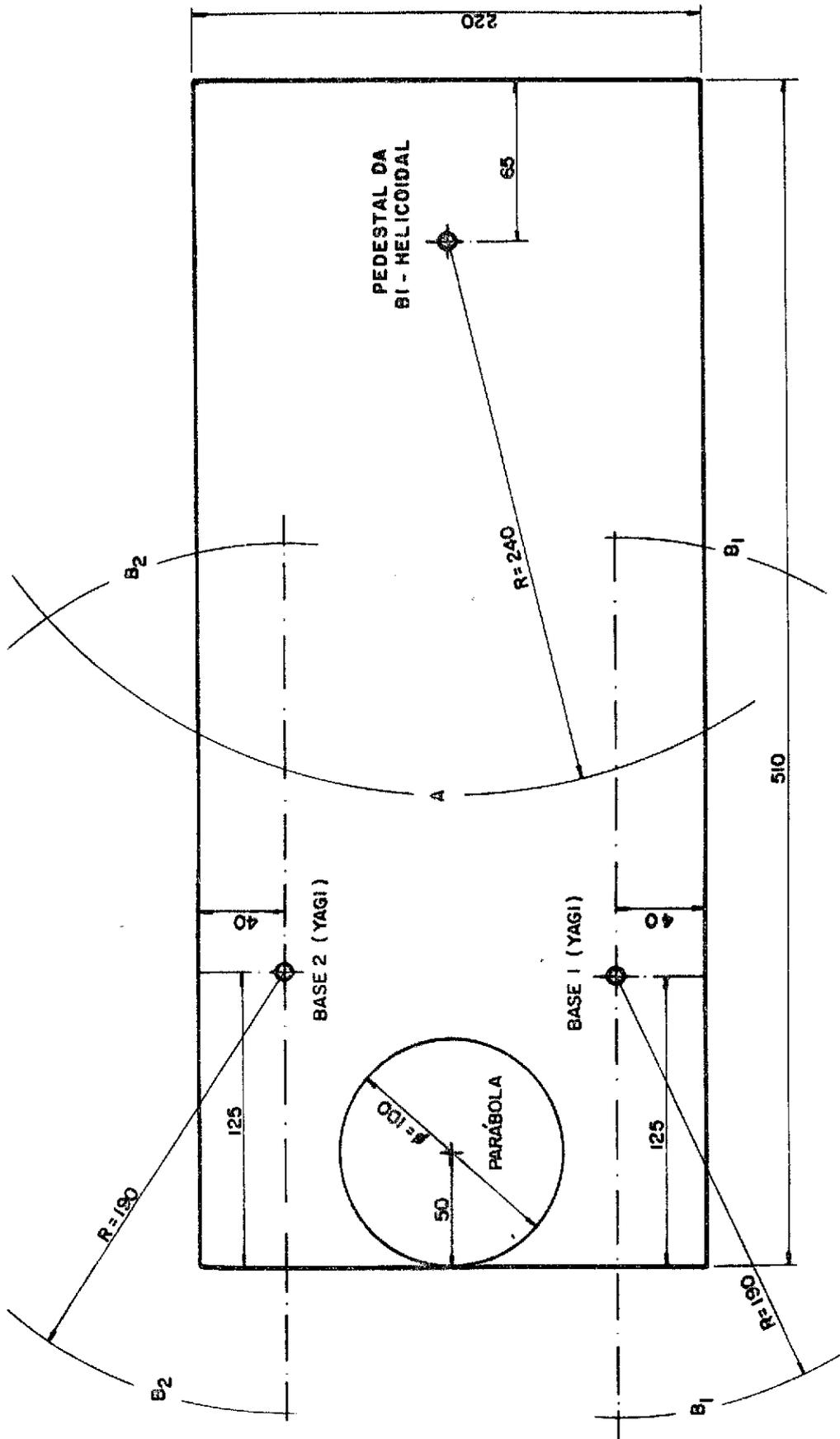


Fig. 16 - Desenho esquemático da disposição física ("layout") das antenas no teto da cabine da estação móvel, com dimensões em cm.

5 - ANTENAS PARA ESTAÇÕES FIXAS

A solução encontrada para a estação móvel, isto é, o uso da antena Yagi otimizada com quatro elementos e da antena bi-helicoidal, será aproveitada, com ligeiras modificações, também para as estações fixas em Cachoeira Paulista e São José dos Campos.

Como foi explicado anteriormente, as antenas para estações fixas não estão sujeitas às condições tão restritivas com respeito às dimensões físicas, como acontece com as da estação móvel.

Assim sendo, o número de espiras helicoidais para a antena da telemetria em 240 MHz será aumentada de 7 para 10, o que, por sua vez, incrementará de 14 para 20 o número de espiras da antena de telecomando em 460 MHz. Com isto, espera-se que as duas antenas tenham ganhos da ordem de 2 dB maiores que os da estação móvel, aumentando a margem de relação sinal-ruído quanto ao limiar de detecção. Isto implica maior imunidade com relação ao efeito perturbador do ruído, fixando-se o alcance de operação em 500 km, ou, em contrapartida, aumento do alcance desejado, caso se mantenha a mesma qualidade do sinal.

Quanto à antena Yagi, no entanto, optou-se pela manutenção das dimensões da estação móvel, isto porque a relação sinal-ruído estimado de 24 dB antes da demodulação, como calculado na Seção 3.4.2, tomando-se a distância a 500 km, ainda é segura contra falhas provenientes de uma falsa detecção ocasionada pelo ruído.

6 - SUBPRODUTO DO PROJETO: FILTRO HELICOIDAL EM 240 MHz

A antena de telecomando em 460 MHz, devido às limitações físicas dos campos de antenas das estações, deve operar nas proximidades da antena de telemetria em 240 MHz. Assim sendo, a potência de 8 watts de telecomando poderia perturbar o sinal do receptor, caso nenhuma providência fosse tomada para eliminar essa interferência.

No caso da antena bi-helicoidal, esse problema torna-se ainda mais crítico, pois a espira da hélice transmissora está enrolada em torno do mesmo eixo longitudinal da espira helicoidal receptora. Assim, inevitavelmente o desacoplamento entre as antenas de telecomando e de telemetria é insuficiente, no caso ao redor de 30 dB. Isto exige o emprego de filtro de boa seletividade e baixa perda de inserção, a ser introduzida antes do reforçador de sinal de telemetria. Um filtro helicoidal protótipo de três seções circulares foi desenvolvido, por satisfazer as condições exigidas e apresentar excelentes qualidades, preenchendo plenamente a especificação requerida.

Esse filtro helicoidal está sendo usado em condições operacionais na estação principal de São José dos Campos, eliminando totalmente a interferência causada pelo sinal de telecomando em 460 MHz no sinal de telemetria em 240 MHz.

Mais três filtros helicoidais deverão ser reproduzidos a partir do filtro do protótipo para as três estações rastreadoras, ficando este último de reserva.

Detalhes sobre o projeto, assim como as dimensões físicas desse filtro helicoidal, poderão ser vistas em Koshima (c).

6.1 - CARACTERÍSTICAS DO FILTRO HELICOIDAL

Nas medições efetuadas foram constatadas as seguintes características:

6.1.1 - ATENUAÇÃO DE TRANSMISSÃO

De acordo com a Figura 17, a rejeição do sinal é maior que 50 dB para frequências acima de 350 MHz e inferiores a 190 MHz.

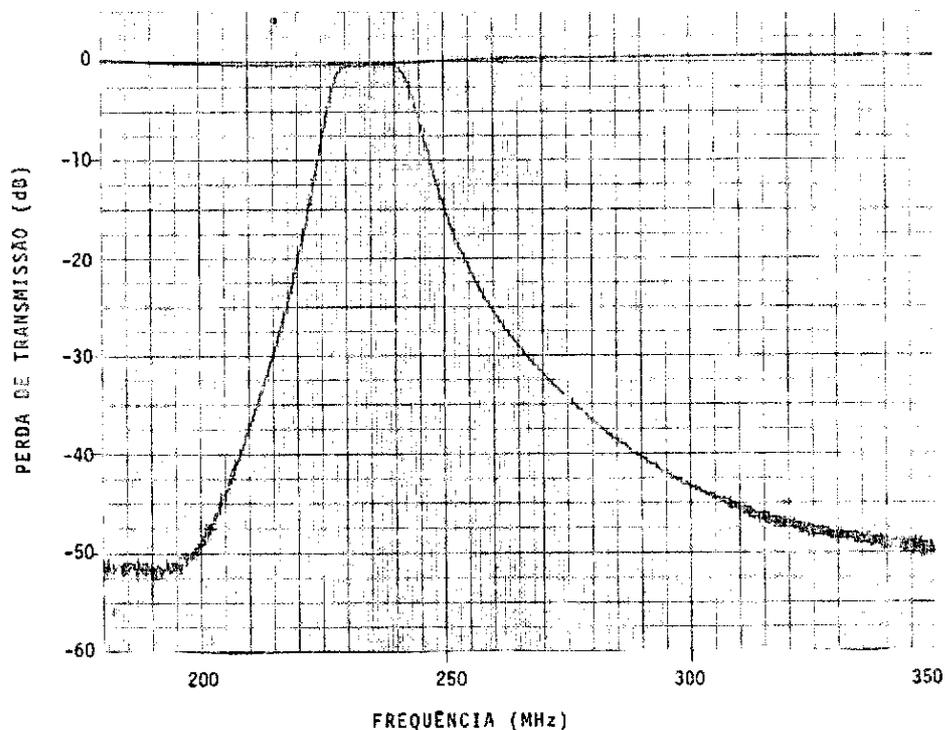


Fig. 17 - Curva de atenuação de transmissão do filtro helicoidal de três seções circulares.

6.1.2 - PERDA DE INSERÇÃO

A perda de inserção entre 232 a 238 MHz é menor que 0,3 dB, um desempenho excelente em termos de filtro, como pode ser visto na Figura 18.

6.1.3 - PERDA DE RETORNO

A perda de retorno é inferior a -25 dB entre 232 a 240,5 MHz num dos acessos, indicando a baixa taxa de onda estacionária existente no mesmo, como pode ser observado na Figura 19. A perda de retorno no outro acesso tem comportamento semelhante ao apresentado.

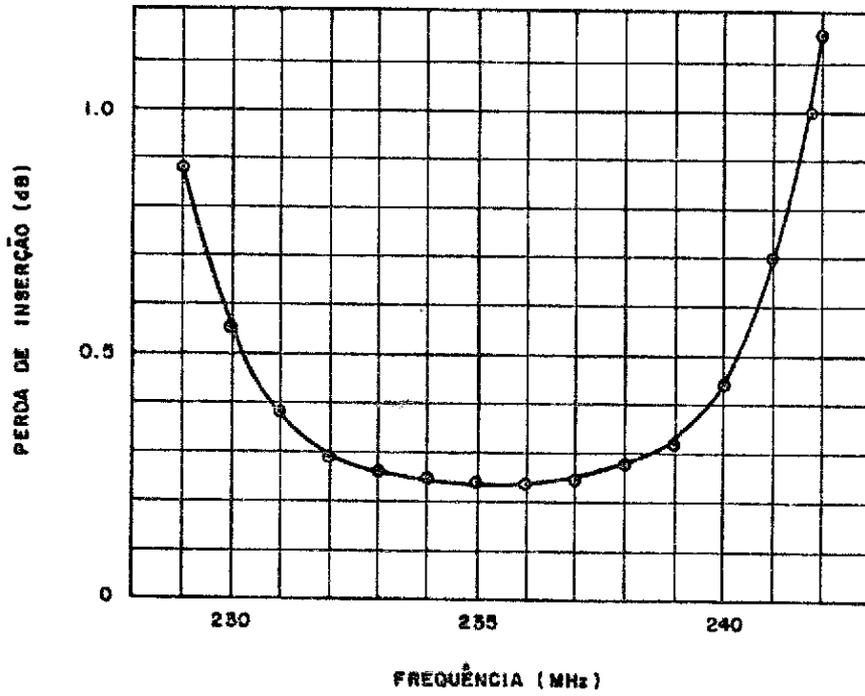


Fig. 18 - Perda de inserção do filtro helicoidal de três seções circulares.

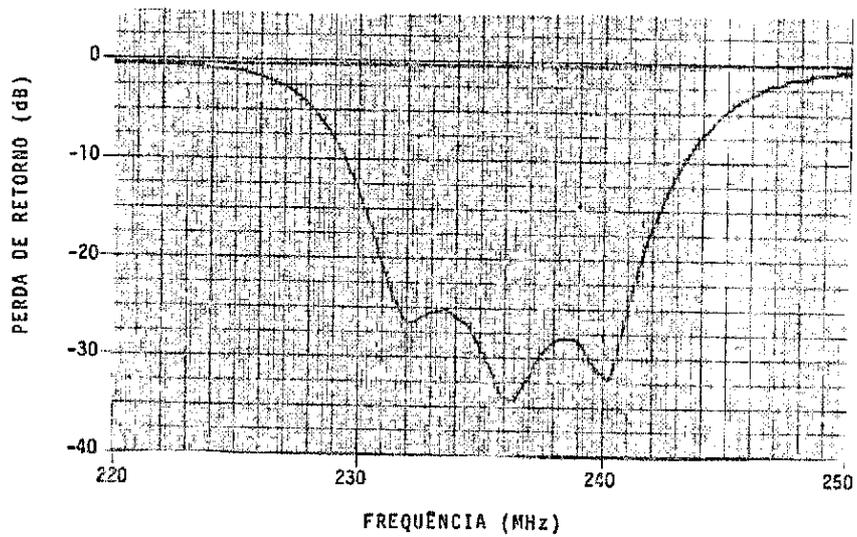


Fig. 19 - Perda de retorno num acesso do filtro helicoidal de três seções circulares.

7 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a solução completa encontrada para o projeto do sistema de antenas para estações de rastreamento de balões estratosféricos.

Como foi explicado no decorrer desse trabalho, o núcleo central do projeto foi a concepção do sistema de antenas para a estação móvel, pois as antenas das estações fixas foram definidas a partir daquelas.

Graças ao difícil desafio em instalar quatro antenas na estação móvel, foi necessário conceber a inovadora antena bi-helicoidal, com características excelentes em termos de aproveitamento do espaço útil, transporte, armazenamento, custo de produção e operação.

Além dessas vantagens, o comportamento direcional dessa antena é plenamente satisfatório, como pode ser verificado nos diagramas de irradiação apresentados, tanto para o telecomando em 460 MHz, como para a telemetria em 238,5 MHz. As medições efetuadas comprovaram também valores razoáveis para os ganhos nas faixas de telecomando e telemetria. A largura da faixa de casamento de impedância, obtida em ambas as faixas de utilização, é excelente em termos de qualquer antena comercial.

O programa computacional para otimização da antena Yagi (Koshima, 1976) também foi de enorme utilidade para esse projeto.

A antena bi-helicoidal, para seu adequado funcionamento, exigiu o projeto de um filtro helicoidal de três seções circulares que, por sua vez, mostrou excelentes características quanto à perda de inserção bastante baixa.

O projeto desse sistema de antenas já foi totalmente concluído, com todos os protótipos construídos e testados. Inclusive esses

protótipos de antena bi-helicoidal, da Yagi otimizada de quatro elementos e do filtro helicoidal, estão operando provisoriamente na estação principal em São José dos Campos, sem nenhum problema. Entretanto, a execução desse projeto ainda está em andamento, faltando implantar os conjuntos das antenas para estações fixas. As construções dos elementos restantes ocorrerão sem nenhuma dificuldade, pois trata-se de reproduzir, com ligeiras modificações, os protótipos das antenas e do filtro helicoidal. Espera-se que, até fins de agosto desse ano, todas as antenas e todos os filtros estejam operando nas três estações do INPE, para o rastreamento de balões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JASIK, H. *Antena Engineering Handbook*. New York, Mc Graw-Hill, 1961.
- KOSHIMA, S. *Antena bi-helicoidal, uma solução simultânea para antena de telemetria e telecomando*. São José dos Campos, INPE, a. Nota Técnica Interna do INPE a ser publicada.
- _____ *Cálculos de enlaces de sistema de estações do INPE para rastreamento de balões estratosféricos*. São José dos Campos, INPE, b. Nota Técnica Interna do INPE a ser publicada.
- _____ *Filtro helicoidal de três seções em 240 MHz*. São José dos Campos, INPE, c. Nota Técnica Interna do INPE a ser publicada.
- _____ *Otimização das alturas e espaçamentos dos elementos de uma antena Yagi-Uda*" Dissertação de Mestrado em Eletrônica e Telecomunicações. São José dos Campos, Julho 1976 (INPE-920-TPT/SNE).
- _____ *Projeto de uma antena de telecomando em 126,8 MHz para estação rastreadora de balão*. São José dos Campos, Junho 1981 (INPE-2100-NTI/156).
- KRAUS, J.D. *Antennas*. New York, Mc Graw-Hill, 1950.