

RONIR HEIDY CORREA PINTO

**PROJETO DE UMA ANTENA
QUADRIFILAR DE MEIA ESPIRA E
MEIO COMPRIMENTO DE ONDA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Eletrônica.

ORIENTADOR: Prof. Doutor José Carlos Sartori.

São Carlos
2007

Agradecimentos

Ao Projeto ITASAT que possibilitou o início desta pesquisa.

Ao Prof. Adabo que me incentivou e deu apoio ao meu permanecimento no projeto, acreditando no meu empenho.

Ao Prof. Sartori que foi muito mais que um orientador, sempre atento e disposto a passar seu conhecimento e experiência.

Aos participantes do projeto ITASAT, que compartilharam bom tempo no decorrer do projeto.

Ao Gustavo Traballi que nos ajudou com o desenvolvimento do programa para conversão de dados.

Aos sempre solícitos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica. E a todos aqueles que de forma direta ou indireta colaboraram com a elaboração deste trabalho. Muito Obrigado!

Resumo

O Brasil, como qualquer país no mundo, busca um bom posicionamento no cenário mundial e um bom indicador para isto é o seu desenvolvimento no setor aeroespacial. Considerado este aspecto, o presente trabalho teve como objetivo dar início a um processo de formação de recursos humanos neste setor. O estudo foi realizado a respeito da melhor antena a ser utilizada no satélite universitário em projeto, que será aplicada no transponder de coleta de dados. Assim, foi feita uma análise dos requisitos que ela deveria possuir escolhendo, portanto, o melhor tipo de antena a ser utilizada no desenvolvimento do trabalho. Logo, a antena quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda mostrou-se como a mais adequada à aplicação, assim, foram feitos estudos de suas características, como funcionamento e sistema de alimentação e em seguida buscaram-se fontes que fornecessem métodos de dimensionamento da antena. Como um meio de se testar, analisar e otimizar a antena foi utilizado um software de simulação que faz uso de uma técnica numérica, amplamente referida como Método dos Momentos, para fornecer características como impedância, diagrama de radiação, relação de onda estacionária e ganho. Dando continuidade à pesquisa foram simuladas três antenas diferentes buscando a que possuísse entre elas o melhor dimensionamento. Por fim, foi construído um protótipo desta antena de forma a fornecer um aprendizado sobre sua construção e uma maior compreensão de seu funcionamento e desempenho.

Palavras-chave: Antena, quadrifilar, espira, Método dos Momentos, impedância, ROE.

Abstract

Brazil, as any country in the world searches a good positioning in the world-wide scenario, and a good pointer for that is its development in the aerospace sector. Considered this aspect, the present research aims to give a start to a process of human resources formation in this sector. The study was carried through regarding the best antenna to be used in the university satellite project, which will be applied on the data collect transponder. Thus, it was made an analysis of the requirements it should had have, choosing the best type of antenna to be used in the development of the work. The half turn, half-wavelength, quadrifilar antenna, revealed as most adequate to the application so, studies of its characteristics had been made, as operation and feeding system, and straight afterwards, searches had been made to find sources of the antenna sizing method. As a way of testing, analyzing and to optimize the antenna, a simulation software was used, which makes use of a numerical technique which is widely referred to as the Moment Method to supply characteristics as impedance, radiation diagram, standing wave ratio and gain, and giving continuity to the research three different antennas had been simulated searching the one that had, between them, the best sizing. Finally, a prototype of this antenna was constructed with the objective of learning on its construction and a bigger understanding of its operation and performance.

Key-words: Antenna, quadrifilar, turn, Moment Method, impedance, SWR.

Lista de Figuras

Figura 1. Representação de uma Onda Eletromagnética Linearmente Polarizada.	2
Figura 2. Representação de uma Onda Eletromagnética Circularmente Polarizada.	2
Figura 3. SBCDA.....	3
Figura 4. Antena em Banda-S Utilizada nos Satélites CBERS-1 e 2.....	6
Figura 5. Antena Quadrifilar Alimentada com Defasador.	7
Figura 6. Representação do Lugar Geométrico que Proporciona Defasagem de 90° entre os Bifilares.....	8
Figura 7. Antena Quadrifilar “Auto-Defasada”.	9
Figura 8. Representação de baluns de $\lambda / 4$. “Folded” (a) e “Split-Sheat” (b).	10
Figura 9. Interface MMANA-GAL - Inserção de Pontos.....	12
Figura 10. Interface MMANA-GAL – Interpretação dos Pontos.	12
Figura 11. Interface MMANA-GAL – Diagrama de Radiação.	13
Figura 12. Estrutura Física da Primeira Antena para Testes.....	14
Figura 13. Modificação do Desenho da Antena.....	15
Figura 14. Protótipo Desenvolvido em Laboratório.	17
Figura 15. Resultados da Simulação da Primeira Antena para Testes.....	18
Figura 16. Varredura de Freqüência da Antena Teste (SWR).....	19
Figura 17. Melhor Ponto de Operação Para a Antena Teste.....	20
Figura 18. Resultados da Primeira Antena para Testes no Melhor Ponto de Operação...	20
Figura 19. Resultados da Simulação da Antena Ideal Otimizada.	21
Figura 20. Varredura de Freqüência do Modelo Ideal Otimizado.	22
Figura 21. Resultados da Antena Ideal Otimizada no Melhor Ponto de Operação.	23
Figura 22. Resultados da Simulação da Antena Real Otimizada.	24
Figura 23. Varredura de Freqüência do Modelo Real Otimizado.....	25
Figura 24. Resultados da Antena Real Otimizada no Melhor Ponto de Operação.	25
Figura 25. Esquemático do Casamento de Impedâncias.	26
Figura 26. Relação de Onda Estacionária no Analisador de Rede.....	27
Figura 27. Diagrama de Radiação Com Distribuição Lateral.....	29
Figura 28. Representação da Órbita do Satélite com Angulação da Distribuição do Diagrama de Radiação.	30

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características dos satélites SCD-1/2.....	4
Tabela 2 - Dimensões da Primeira Antena.....	13
Tabela 3 - Dimensões da Segunda Antena.....	14
Tabela 4 – Material Utilizado para.....	16
o Desenvolvimento do Protótipo.	16
Tabela 5 - Resultados da Primeira Antena para Testes.....	18
Tabela 6 - Resultados da Primeira Antena para Testes no Melhor Ponto de Operação.....	21
Tabela 7 – Resultados da Antena Ideal Otimizada.	21
Tabela 8 - Resultados da Antena Ideal Otimizada no Melhor Ponto de Operação.....	23
Tabela 9 - Resultados da Antena Real Otimizada.....	24
Tabela 10 - Resultados da Antena Real Otimizada no Melhor Ponto de Operação.	25

Lista de Siglas

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

LIT – Laboratório de Integração e Testes.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

PCDs – Plataformas de Coleta de Dados.

SBCDA – Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais.

SWR – Relação de Onda Estacionária (Stand Wave Ratio).

TT&C – Telemetria, Rastreamento e Comando (Telemetry, Tracking and Command).

Sumário

Resumo.....	i
Lista de Tabelas	iv
Lista de Siglas	v
Lista de Siglas	v
1. Introdução.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Parâmetros Iniciais.....	1
1.3 Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais.....	3
2. Objetivos.....	5
3. Revisão Bibliográfica.....	6
4. Material e Método	11
4.1 Introdução ao Software de Simulação MMANA-GAL.....	11
4.2 Antena Teste.....	13
4.3 Modelo Ideal da Antena Otimizada.....	14
4.4 Modelo Real da Antena Otimizada	15
4.5 Construção da Antena Teste.....	16
5. Resultados e Discussão.....	18
5.1 Antena Teste.....	18
5.2 Modelo Ideal da Antena Otimizada.....	21
5.3 Modelo Real da Antena Otimizada	23
5.4 Protótipo da Antena Teste	26
6. Conclusões.....	28
7. Sugestões.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1. Introdução

1.1 Apresentação

A evolução do segmento aeroespacial de um país sempre se apresentou como um indicador de desenvolvimento. A conquista do espaço se torna uma realização, para este grupo minoritário composto pelas potências mundiais.

O Brasil, da mesma forma, tem buscado esta conquista, alcançando recentemente, em parceria com a China, uma posição no seleto grupo de países detentores da tecnologia de sensoriamento remoto.

Com isso, a procura por recursos humanos no segmento aeroespacial se torna maior a cada dia e, neste propósito, foi lançado o projeto governamental ITASAT iniciando uma linha de pesquisa voltada a aplicações desta área, mais especificamente à utilização em satélites. Como objetivo maior, o satélite em desenvolvimento tem a função de retransmitir dados enviados por Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) de uma região, para estações de recepção que irão processar os dados posteriormente. Esta importância dada ao setor de telecomunicações é refletida diretamente no trabalho proposto deste documento.

1.2 Parâmetros Iniciais

A antena utilizada em um satélite é um dos elementos principais para que se estabeleça um enlace de comunicação, e em seu dimensionamento devem ser considerados diversos fatores que satisfaçam os requisitos necessários para uma boa qualidade de serviço. Para se conseguir uma comunicação com diversos pontos do Brasil, o satélite não pode possuir uma órbita geoestacionária, e a baixa potência disponível para transmissão não permite desperdícios impondo que, o diagrama de radiação desta antena seja do tipo cardióide e que ela possua uma alta relação frente-costa.

A Rotação de Faraday, conhecida pelos seus efeitos em ondas eletromagnéticas, causa uma grande influência na geometria desta antena. A passagem de uma onda eletromagnética pela atmosfera terrestre sofre uma rotação, ou seja, considerando o vetor de propagação no eixo z , os campos elétrico e magnético adquirem um novo ângulo em relação aos eixos x e y . Esta situação pode ser melhor visualizada na Figura 1, imaginando-se que esta rotação seria equivalente à rotação do segmento roxo, que representa a projeção da resultante do campo eletromagnético no plano xy .

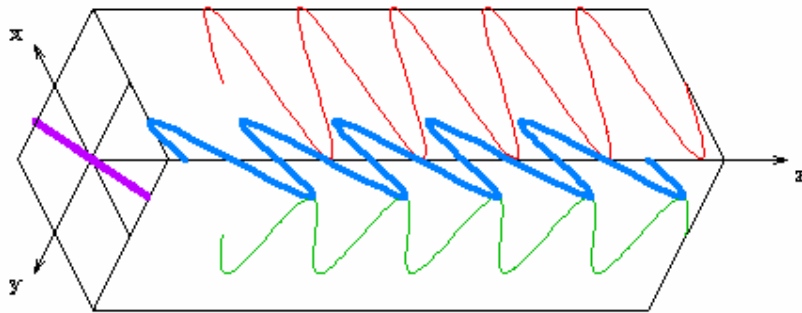


Figura 1. Representação de uma Onda Eletromagnética Linearmente Polarizada.

Esta consequência afeta diretamente a qualidade de recepção, pois caso haja uma rotação de 90° , o nível do sinal será praticamente nulo na antena perdendo-se totalmente os dados transmitidos.

A solução para o problema existente é fazer com que haja uma polarização circular da onda eletromagnética, contornando assim, os efeitos da Rotação de Faraday, ou seja, construindo uma antena com geometria helicoidal.

Um exemplo de uma onda polarizada circularmente é mostrado na Figura 2. Nota-se que a resultante possuirá sempre a mesma forma, independente do ângulo de rotação sofrido.

Admite-se portanto que a antena de recepção também possui polarização circular, o que realmente ocorre na prática.

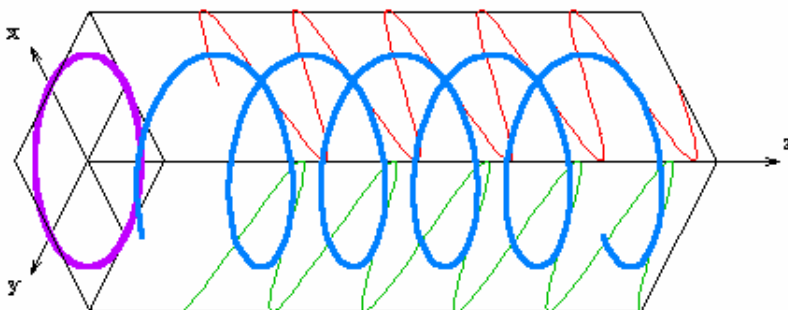


Figura 2. Representação de uma Onda Eletromagnética Circularmente Polarizada.

Finalmente, o parâmetro mais importante a ser estabelecido é a frequência de operação a ser utilizada na transmissão dos dados. Os sistemas operantes no Brasil trabalham em duas frequências diferentes, uma para o lance de subida (uplink), na faixa de UHF e outra no lance de descida (downlink), na Banda-S. Por maior simplicidade e facilidade de trabalho e pela necessidade de adaptação do projeto à tecnologia já existente, este documento irá abordar o sistema na faixa de UHF.

1.3 Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais

O Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCDA), representado simplificadaamente na Figura 3, é constituído pelos satélites SCD-1, SCD-2 e CBERS-2 (segmento espacial), pelas diversas redes de plataformas de coleta de dados, pelas Estações de Recepção de Cuiabá e de Alcântara, e pelo Centro de Missão de Coleta de Dados ou Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

A função dos satélites é, basicamente, retransmitir dados, sendo que as plataformas são geralmente configuradas para transmitir durante 1 segundo, a cada 200 segundos.

Os satélites citados operam em duas faixas de frequência UHF, para recepção dos dados enviados pelas PCDs, (em torno de 401,62 MHz e de 401,65 MHz), e na Banda-S (2.267,52 MHz) para retransmissão dos sinais.



Figura 3. SBCDA.

Para garantir uma cobertura de todo o território nacional, os satélites SCD-1 e SCD-2 possuem órbitas complementares, sendo que ambos completam 14 órbitas por dia e o SCD-1 possui 8, dessas, visíveis à estação principal de Cuiabá.

Os dados das plataformas, enviados para os satélites, são retransmitidos para as estações de Cuiabá ou de Alcântara, e em seguida são enviados para o Centro de Missão em Cachoeira Paulista para processamento, armazenamento e disseminação para os usuários. O envio dos dados ao usuário é feito via Internet em no máximo 30 minutos após a recepção.

Para detalhar melhor os satélites modelo SCD-1 e SCD-2 segue abaixo a Tabela 1 com algumas especificações.

Tabela 1 - Características dos satélites SCD-1/2.

MASSA	115 kg (SCD-1) 117 kg (SCD-2)
DIMENSÕES	DIÂMETRO DA BASE – 100 cm ALTURA – 80 cm
ESTABILIZAÇÃO POR ROTAÇÃO	SCD-1: 120 RPM (INICIAL) SCD-2: 34 RPM
ÓRBITA	CIRCULAR A 750 km INCLINAÇÃO DE 25° 14 REVOLUÇÕES/DIA
“Telemetry, Tracking and Command” (TT&C)	BANDA S, PADRÃO ESA
VIDA ÚTIL NOMINAL	1 ANO (SCD-1) 2 ANOS (SCD-2)

2. Objetivos

O objetivo desta investigação é o estudo da melhor antena a ser utilizada em um satélite considerando as variáveis aplicadas ao sistema, definindo assim, características físicas como dimensões e material a ser utilizado, e de desempenho, como impedância, relação de onda estacionária, ganho e relação frente-costa, buscando ainda uma otimização do projeto.

3. Revisão Bibliográfica

Na revisão da literatura buscou-se relacionar resultados de pesquisas sobre antenas quadrifilares que fornecessem subsídios para este trabalho.

A antena mais adequada, e previamente testada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), é a quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda (GONÇALVES e RODRIGUES, 2004). A Figura 4 mostra uma foto da antena de Banda-S utilizada no satélite CBERS-1 e 2.



Figura 4. Antena em Banda-S Utilizada nos Satélites CBERS-1 e 2.

De acordo com Bricker e Rickert (1974), existem dois tipos de dimensionamento principais para uma antena quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda. A primeira define que as duas espiras possuem mesmo comprimento e a segunda define que elas possuem comprimentos ligeiramente diferentes.

Para melhor compreensão, algumas considerações precisam ser feitas, segundo o estudo referido acima. A antena quadrifilar é de um modo geral uma fração de uma helicoidal, contendo quatro elementos, que também podem ser interpretados como sendo dois bifilares ortogonais, alimentados em quadratura de fase, onde um bifilar é uma helicoidal de dois elementos. Cada bifilar apresenta um padrão circularmente polarizado com forma toroidal e a união de dois bifilares produz uma diretividade ao diagrama de radiação, definida pela defasagem entre eles.

Deste modo, para se obter um diagrama de radiação e uma polarização adequada, é necessária uma defasagem de 90° obtida de duas formas segundo os dois tipos principais de antena.

Também estudado por Amin e Cahill (2005), a defasagem de 90° , para a antena com bifilares de mesma dimensão, é alcançada através da utilização de um híbrido com alimentação independente para cada bifilar, o que pode ser melhor compreendido analisando-se a Figura 5, considerando V_1 uma fonte de alimentação do tipo $A \cdot \sin(\omega t)$, onde A é a amplitude e ω a frequência do sinal, e V_2 uma fonte do tipo $A \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$.

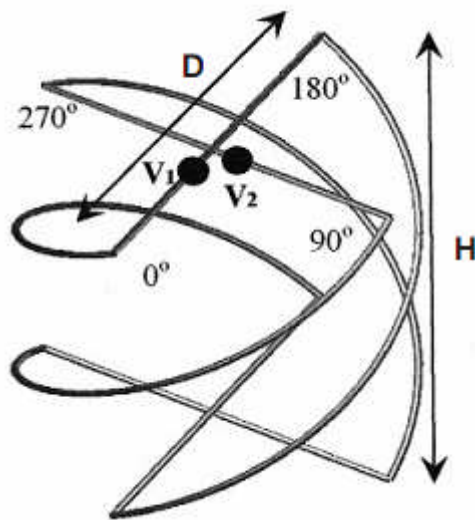


Figura 5. Antena Quadrifilar Alimentada com Defasador.

O segundo método mostra que uma diferença no comprimento dos bifilares produz uma defasagem natural do sistema. Fazendo um bifilar maior em relação à frequência de ressonância desejada e o outro bifilar menor, é possível criar uma defasagem entre os dois. Isto é explicado através da análise da impedância dos bifilares de forma individual, onde o bifilar de maior tamanho apresenta uma impedância do tipo $R + jX$ (indutivo), em relação à frequência de operação, e o bifilar de menor tamanho apresenta uma impedância do tipo $R - jX$ (capacitivo), onde R é a parte resistiva e X a parte reativa. Porém, para que haja uma defasagem de 90° é necessário que a condição, $R = \pm X$, seja satisfeita, ou seja, o bifilar maior irá introduzir uma defasagem de $\pm 45^\circ$, enquanto que o menor irá introduzir uma defasagem de $\mp 45^\circ$.

Esta condição pode ser visualizada facilmente na Figura 6 através da Carta de Smith, com $R = \pm X$ situado no lugar geométrico destacado, e com o melhor ponto de operação em $1+j1$ (para, $Z_0 = 50\Omega$), também destacado na carta.

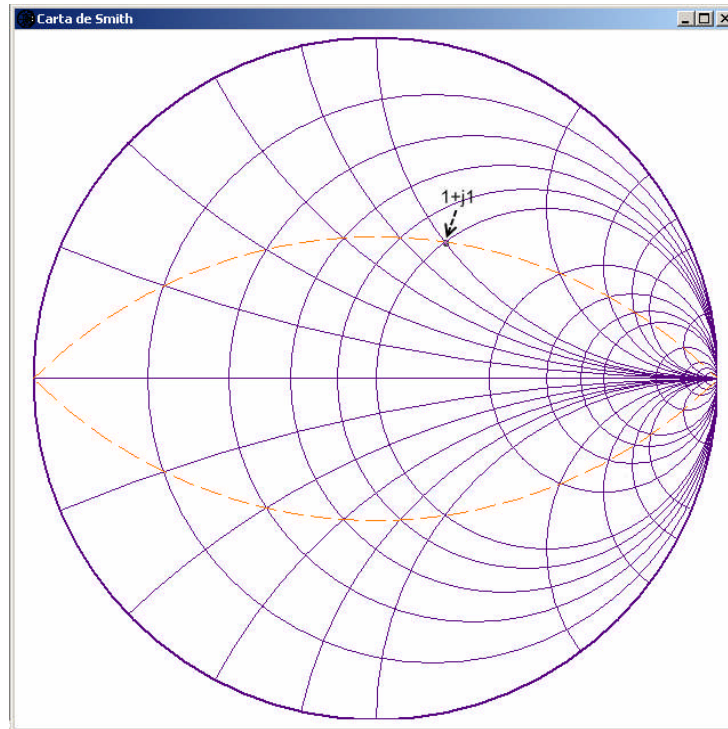


Figura 6. Representação do Lugar Geométrico que Proporciona Defasagem de 90° entre os Bifilares.

Ao se alimentar os dois elementos com apenas uma fonte, as partes reativas se anulam tornando a impedância do sistema apenas resistiva. Visto que os bifilares estão dispostos em paralelo e considerando-se a defasagem entre eles de 90° ($R = \pm X$), então a impedância final fica igual a R .

Um modelo de antena “auto-defasada” está exibido na Figura 7.

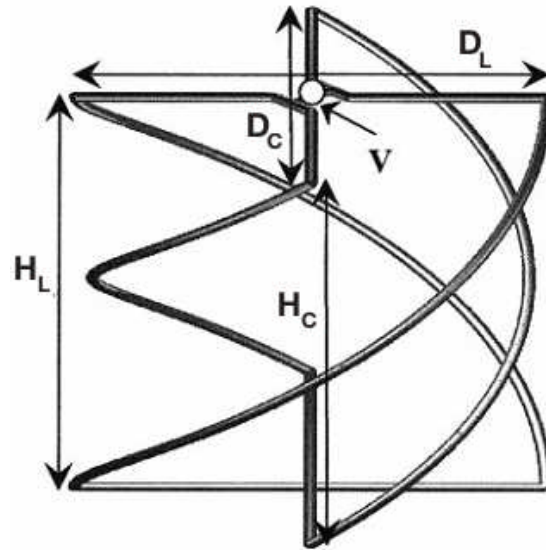


Figura 7. Antena Quadrifilar "Auto-Defasada".

O sistema de alimentação necessita de um balun, visto que a antena é um sistema balanceado e o cabo de alimentação um sistema desbalanceado. Para utilização do sistema com defasador, Fusco, Cahill e Li (2003) utilizaram um balun dobrado ou "folded" balun de $\lambda/4$, ou seja, um toco de $\lambda/4$ curto-circuitado ao cabo coaxial em sua extremidade. Este balun possui uma relação 1:1 para não alterar a impedância vista pela fonte de alimentação.

Outro método também é mostrado como sendo eficiente, apresentando características similares ao anterior, porém com uma construção ligeiramente diferente. O balun de linha fendida ou "split-sheat" balun também é um balun de $\lambda/4$, mas é construído com uma fenda em lados opostos do cabo coaxial de alimentação, como mostrado na Figura 8, juntamente ao folded balun.

Estes dois métodos necessitam um casamento de impedância caso a antena possua impedância diferente da impedância característica do cabo.

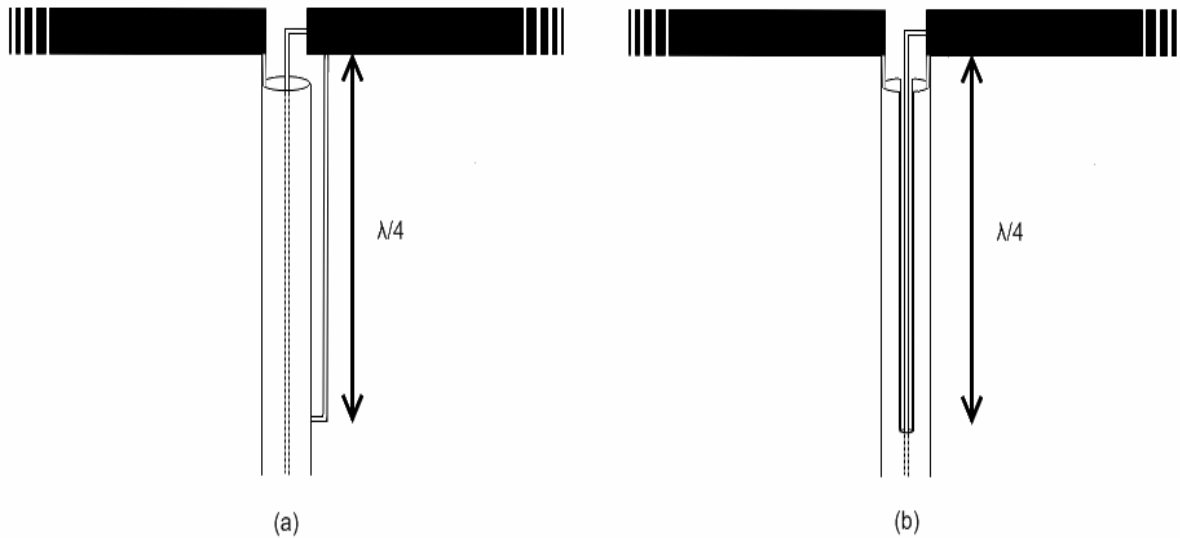


Figura 8. Representação de baluns de $\lambda / 4$. “Folded” (a) e “Split-Sheat” (b).

O último sistema apresentado por Bricker e Rickert (1974) e que se mostrou mais eficiente e de fácil implementação foi o balun infinito, que consiste da utilização de um cabo semi-rígido como um dos elementos de um dos bifilares, porém é necessário que a antena esteja dimensionada corretamente para que o perímetro de cada bifilar seja próximo de 1λ . Com isso a parte restante do cabo não se comporta como um elemento radiante, tornando o balun infinito uma ótima opção para a aplicação desejada (MILLIGAN, 2005).

Utilizando um cabo semi-rígido de 50Ω e sendo a impedância da antena aproximadamente 40Ω , não é necessário um casamento de impedância.

Uma análise geral da revisão bibliográfica mostra que os estudos referentes a antenas quadrifilares ainda estão em fase de desenvolvimento, havendo muitos resultados experimentais, porém pouca base teórica para o desenvolvimento de um projeto.

4. Material e Método

A frequência escolhida para o dimensionamento da antena foi de 401,65 MHz, devido à prévia utilização desta faixa de frequência no Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais, e à maior facilidade de manuseamento por ter dimensões maiores comparada às dimensões que teria uma antena em Banda-S.

Em trabalho conjunto com o aluno Danilo César Santiago, integrante do Projeto ITASAT, foram feitas simulações da antena utilizando o software livre *MMANA-GAL*, que faz uso do Método dos Momentos para simular características como impedância, SWR, diagrama de radiação e ganho do elemento simulado.

Através do software AutoCad, o aluno referido acima desenhou a antena dividida em segmentos de reta, de modo a utilizar as coordenadas destes segmentos no software *MMANA-GAL*, que por sua vez interpreta estes dados como um elemento físico, possibilitando a simulação.

O AutoCad não possui uma comunicação direta para conversão dos dados gerados em um arquivo de leitura adequado ao *MMANA-GAL* sendo portanto, esta passagem feita manualmente, ponto a ponto. Com o propósito de solucionar este problema e prover uma facilidade maior na transferência dos dados, e portanto uma maior dinamicidade às simulações, foi desenvolvido um programa, em linguagem C, para conversão destes dados, promovendo uma “conversação” entre os softwares.

As simulações permitiram uma análise prévia do comportamento da antena para os dimensionamentos referidos em diversos documentos. Estas análises facilitaram o encaminhamento e o foco nos parâmetros de projeto.

4.1 Introdução ao Software de Simulação *MMANA-GAL*

A seguir são exibidas imagens da interface gráfica do *MMANA-GAL*. A Figura 9 mostra o setor de inserção das coordenadas de cada segmento de reta que compõe a antena, tendo também os campos para determinação da localização do tipo de carga (opcional) e alimentação, diâmetro do fio que compõe a antena e frequência de operação.

A Figura 10 mostra a interpretação dos dados inseridos no campo anterior, definindo a forma física do modelo a ser simulado e, finalmente, a Figura 11 exhibe os resultados obtidos como diagrama de radiação no plano de elevação, azimute e no formato 3D, impedância e SWR.

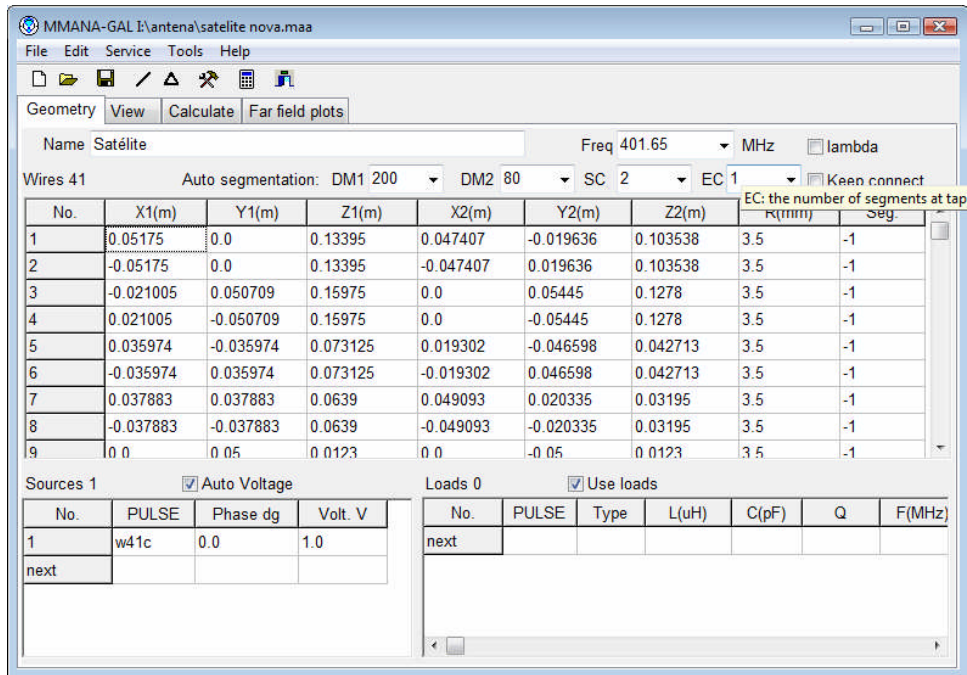


Figura 9. Interface MMANA-GAL - Inserção de Pontos.

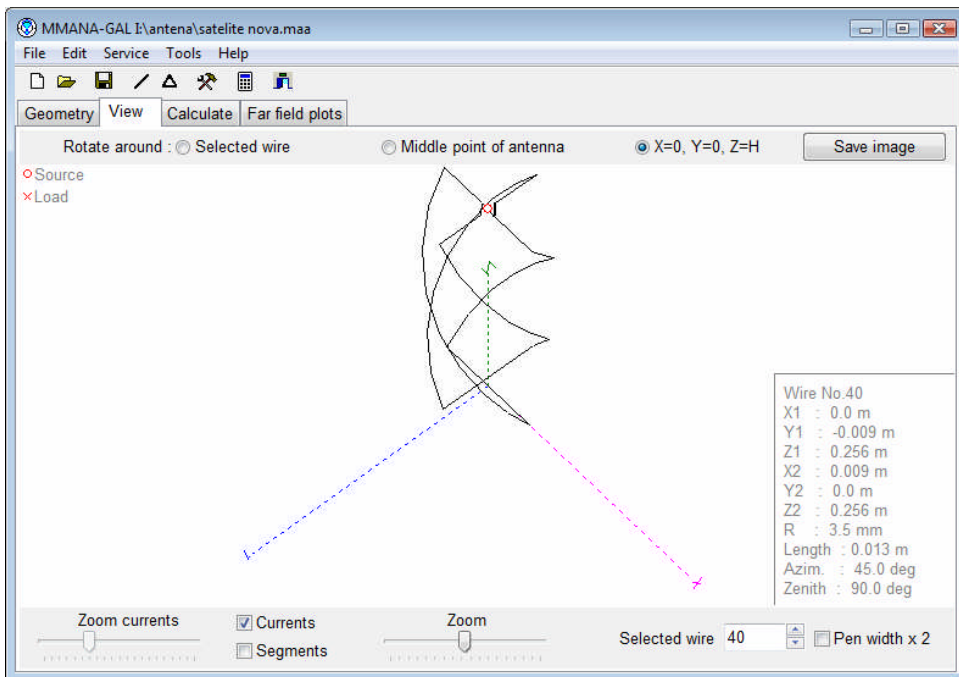


Figura 10. Interface MMANA-GAL – Interpretação dos Pontos.

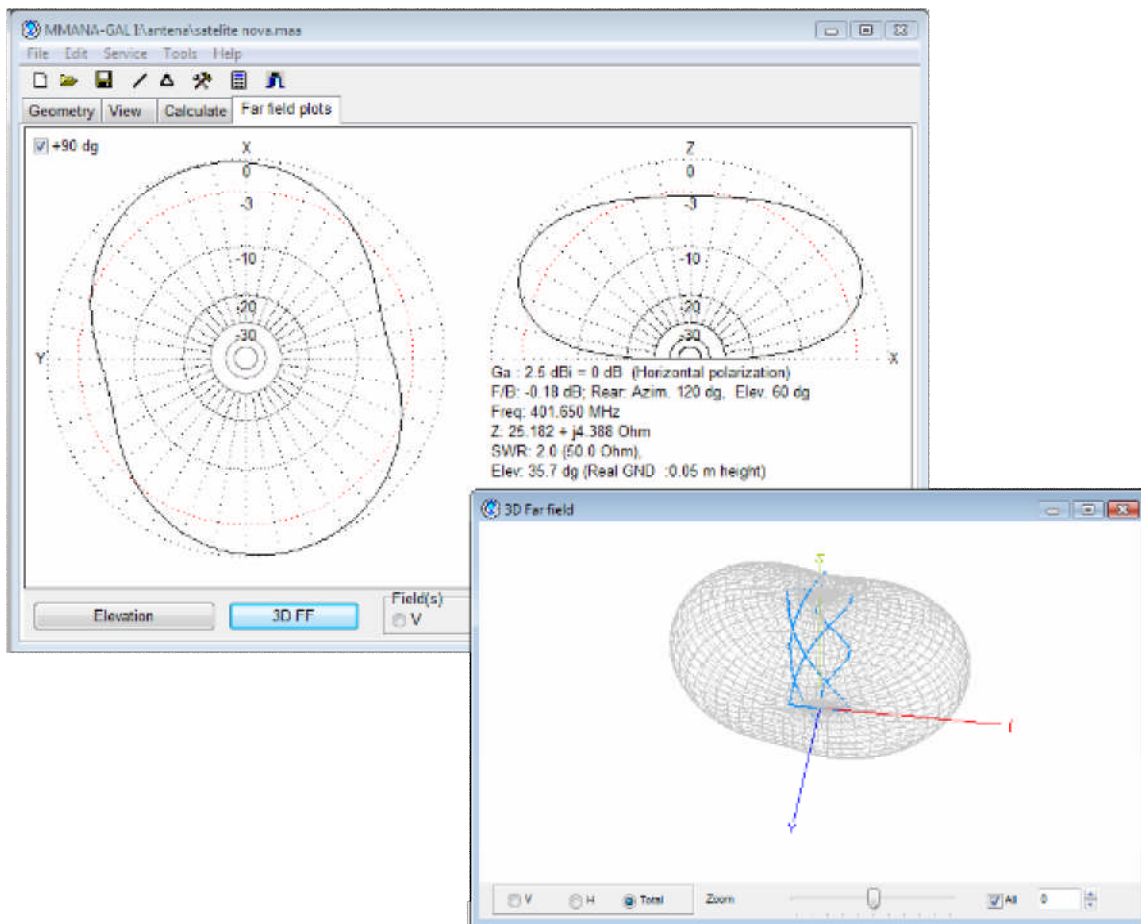


Figura 11. Interface MMANA-GAL – Diagrama de Radiação.

4.2 Antena Teste

A primeira simulação foi realizada com um dimensionamento obtido através de um software de cálculo para antenas quadrilares, de modo a verificar os resultados como um teste inicial.

As dimensões utilizadas estão apresentadas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Dimensões da Primeira Antena.

	Loop Maior (Indutivo)	Loop Menor (Capacitivo)
Altura (cm)	25,6	24,4
Diâmetro (cm)	10,6	10,0
Diâmetro do Condutor (mm)	3,5	3,5

A seguir foram determinados todos os parâmetros fornecidos pelo MMANA-GAL e através destes resultados realizou-se uma varredura de frequência a fim de determinar o ponto de ressonância desta antena. A Figura 12 exibe a aparência física da antena.

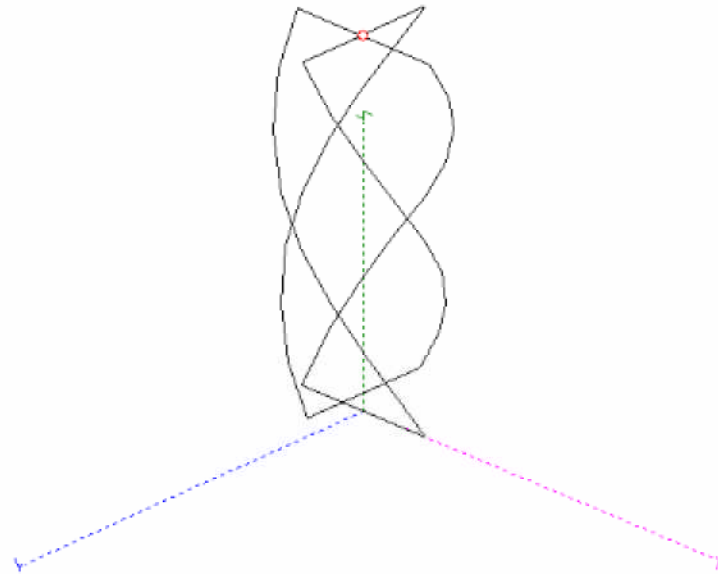


Figura 12. Estrutura Física da Primeira Antena para Testes.

4.3 Modelo Ideal da Antena Otimizada

Como próximo passo, buscando melhores resultados de performance da antena, utilizou-se o dimensionamento fornecido por Bricker e Rickert (1974), onde o mesmo é obtido em função do comprimento de onda na frequência de operação. Estas dimensões são dadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Dimensões da Segunda Antena.

	Loop Maior (Indutivo)	Loop Menor (Capacitivo)
Altura (λ /cm)	0,260/19,42	0,238/17,78
Diâmetro (λ /cm)	0,173/12,92	0,156/11,65
Diâmetro do Condutor (mm)	3,5	3,5

Da mesma forma, foram realizados os testes como no método anterior, com a finalidade de se comparar com os resultados da antena teste.

4.4 Modelo Real da Antena Otimizada

Analisando novamente o modelo utilizado anteriormente é averiguado que o mesmo não apresenta a forma real de uma antena e que uma modificação se apresentava necessária.

Assim uma nova antena foi desenhada para simulação, mas agora apresentando seus cantos com uma forma arredondada e não com um ângulo reto, o que não é possível na prática. A mudança fica clara na Figura 13.

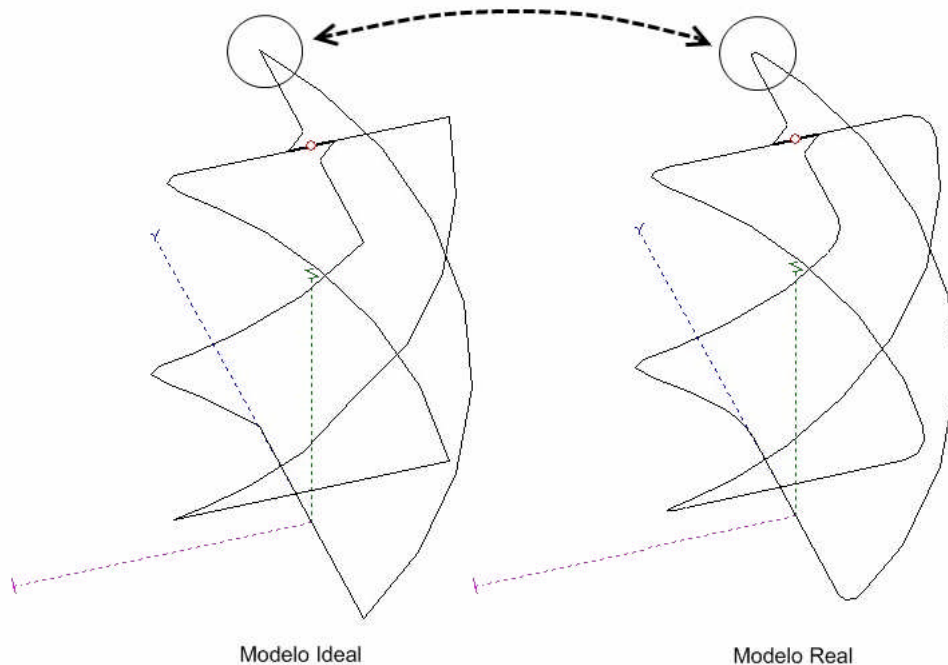


Figura 13. Modificação do Desenho da Antena.

Logo, todos os processos realizados anteriormente também foram feitos para o modelo real.

4.5 Construção da Antena Teste

Anteriormente à utilização do software de simulação foi construída uma antena para fins de aprendizado de construção, de funcionamento e para análise de desempenho.

O fato de a construção ter ocorrido anteriormente à utilização do MMANA-GAL impossibilitou a implementação do modelo otimizado, utilizando-se as dimensões adquiridas na antena teste.

No processo de construção e testes do protótipo foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Material Utilizado para o Desenvolvimento do Protótipo.

Multímetro Digital
Gerador de Sinais
Osciloscópio
Analisador de Rede
Analisador de Espectro
Fios de Conexão
Cabo Coaxial de 50Ω
Placa de Circuito Impresso
1m de PVC de 40mm de diâmetro
2m de Cano de cobre de 6mm de diâmetro
Conector BNC
Trimmers (capacitores variáveis)
Abraçadeira de 40mm

Foi estudada a melhor forma de fixação dos bifilares visando a facilidade de acesso ao sistema de alimentação e a resistência a impactos e movimentos. O sistema de

alimentação ficou situado na parte superior da antena, descendo até a parte inferior onde se encontra o conector de entrada, utilizando-se um balun de $\lambda/4$, 1:1, e trimmers para o casamento de impedância.

A antena resultante está na Figura 14.

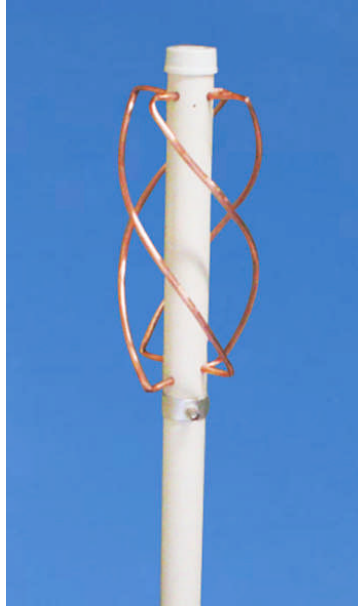


Figura 14. Protótipo Desenvolvido em Laboratório.

5. Resultados e Discussão

Os resultados das simulações tiveram como objetivo principal a elucidação do funcionamento da antena, possibilitando a análise de seu desempenho e viabilidade de aplicação do modelo.

Neste capítulo serão abordadas as três antenas citadas anteriormente na mesma seqüência cronológica, finalizando com a antena experimental.

5.1 Antena Teste

As simulações forneceram os valores de impedância, SWR, ganho, relação frente-costa, ângulo de meia potência e o diagrama de radiação, exibidos na Figura 15 e Tabela 5.

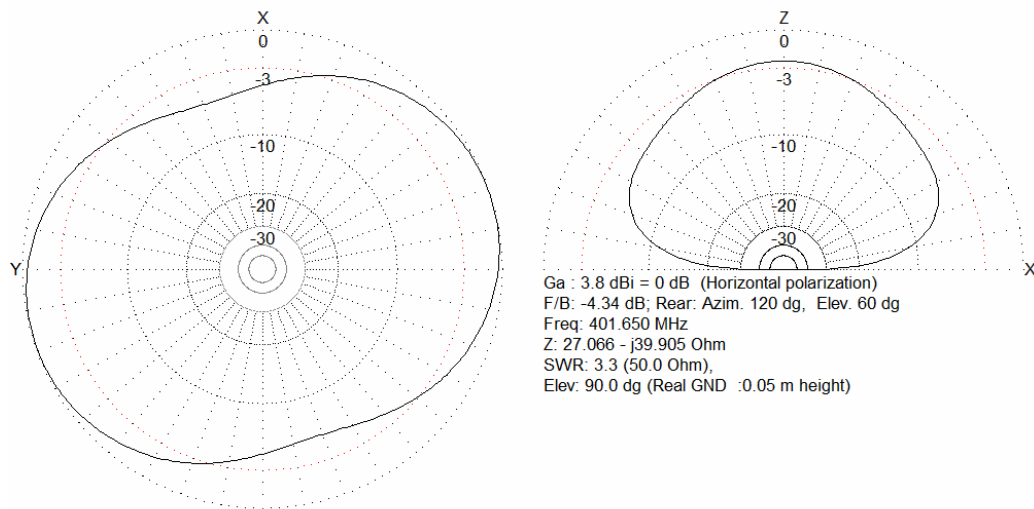


Figura 15. Resultados da Simulação da Primeira Antena para Testes.

Tabela 5 - Resultados da Primeira Antena para Testes.

Primeira Antena Para Testes	SWR	R (Ohm)	jX (Ohm)	Ângulo de 1/2 Potência	Ganho (dBi)
Resultados	3,26	27,07	-39,9	40°	3,8

Os resultados para esta simulação foram insatisfatórios, pois o diagrama de radiação apresentou uma forma diferente da esperada, com ângulo de meia potência muito baixo e relação de onda estacionária muito alta.

Com isso foi realizada uma varredura de frequência em torno de 401,65 MHz, com largura de 80 MHz, verificando-se o SWR resultante. Os valores estão expressos na Figura 16.

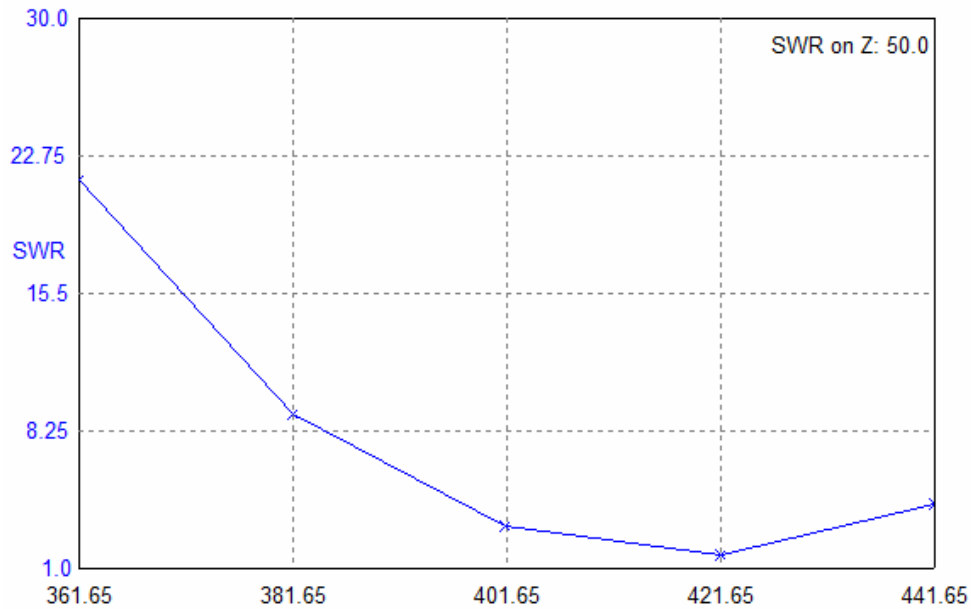


Figura 16. Varredura de Frequência da Antena Teste (SWR).

Analisando o gráfico anterior nota-se que o melhor ponto de operação desta antena está próximo de 421,65 MHz.

Realizando uma nova varredura em torno de 421,65 MHz, mas agora com menor largura de faixa para se alcançar uma maior precisão, obteve-se que o melhor ponto de operação desta antena, que está em 417,7 MHz, mostrado na Figura 17.

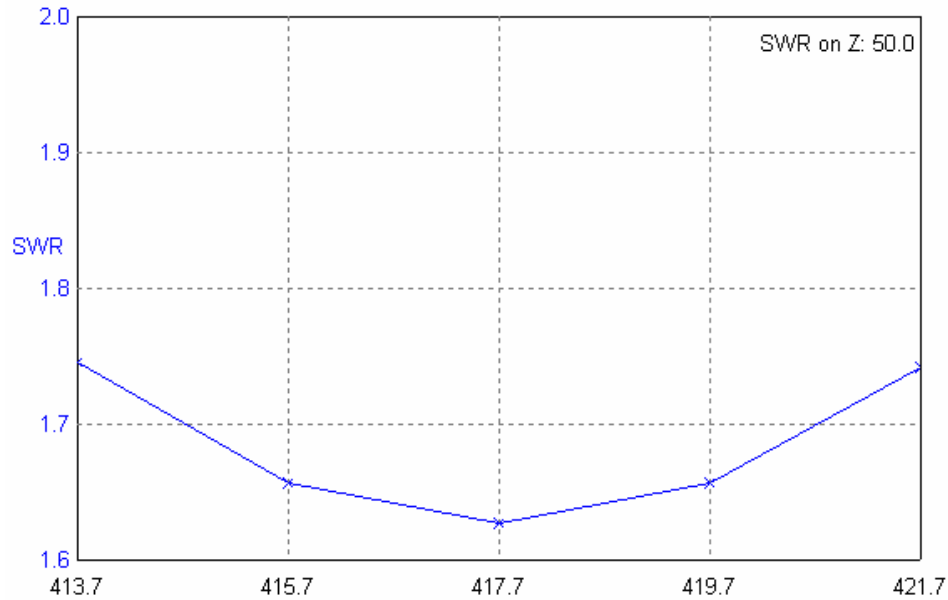


Figura 17. Melhor Ponto de Operação Para a Antena Teste.

Os novos valores obtidos estão expressos na Figura 18 e Tabela 6.

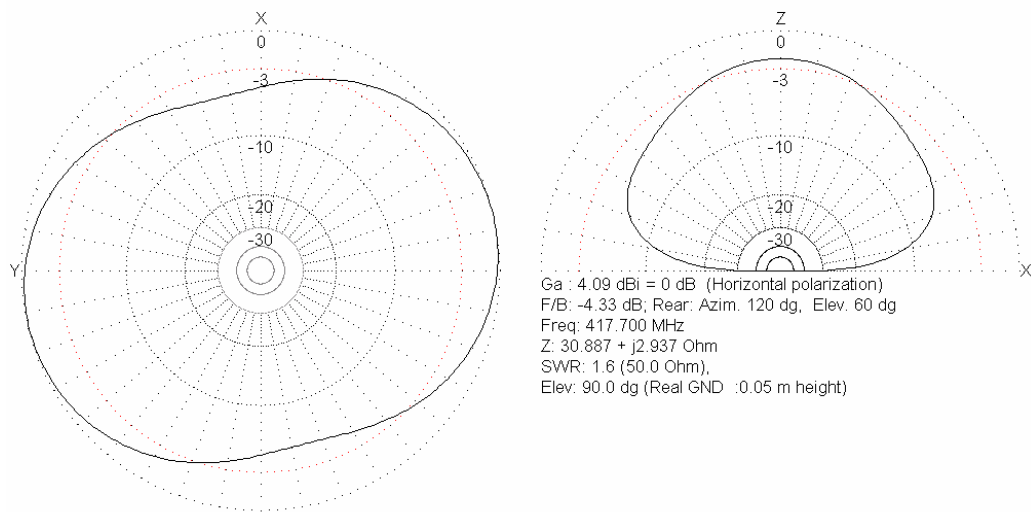


Figura 18. Resultados da Primeira Antena para Testes no Melhor Ponto de Operação.

Estes resultados mostram que para a freqüência de 401,65 MHz a antena simulada possui um comprimento menor do que deveria, pois analisando a equação $v = \lambda \cdot f$, nota-se que o comprimento de onda para 401,65 MHz é de 74,69 cm, enquanto que para o melhor ponto de operação (417,7 MHz), o comprimento de onda é de 71,82

cm. Portanto, como citado na revisão bibliográfica, cada bifilar deve possuir um comprimento de onda próximo de 1λ , logo a antena utilizada possui um comprimento menor do que deveria.

Tabela 6 - Resultados da Primeira Antena para Testes no Melhor Ponto de Operação.

Primeira Antena Para Testes	SWR	R (Ohm)	jX (Ohm)	Ângulo de 1/2 Potência	Ganho (dBi)
Resultados	1,6	30,89	2,94	44°	4,09

5.2 Modelo Ideal da Antena Otimizada

Utilizando o dimensionamento fornecido por Bricker e Rickert (1974), com o modelo ideal exibido na Figura 13 e com uma modificação na alimentação de forma a reproduzir a construção feita por Amin e Cahill (2005), mostrado na Figura 7, foram repetidos todos os processos anteriores obtendo-se os resultados mostrados na Figura 19 e Tabela 17.

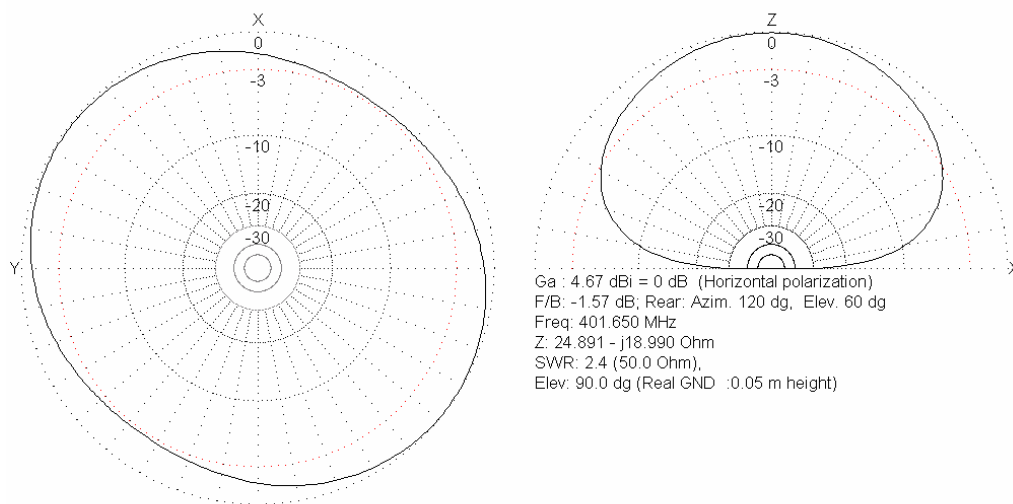


Figura 19. Resultados da Simulação da Antena Ideal Otimizada.

Tabela 7 – Resultados da Antena Ideal Otimizada.

Primeira Antena Para Testes	SWR	R (Ohm)	jX (Ohm)	Ângulo de 1/2 Potência	Ganho (dBi)
Resultados	2.38	24,89	-18,99	120°	4,67

Os resultados para a antena otimizada já se apresentam muito mais próximos do esperado com um maior ângulo de meia potência e SWR mais baixo, porém ainda insatisfatórios para a aplicação desejada.

Realizando novamente a varredura de frequência obtêm-se o gráfico a seguir, representado na Figura 20.

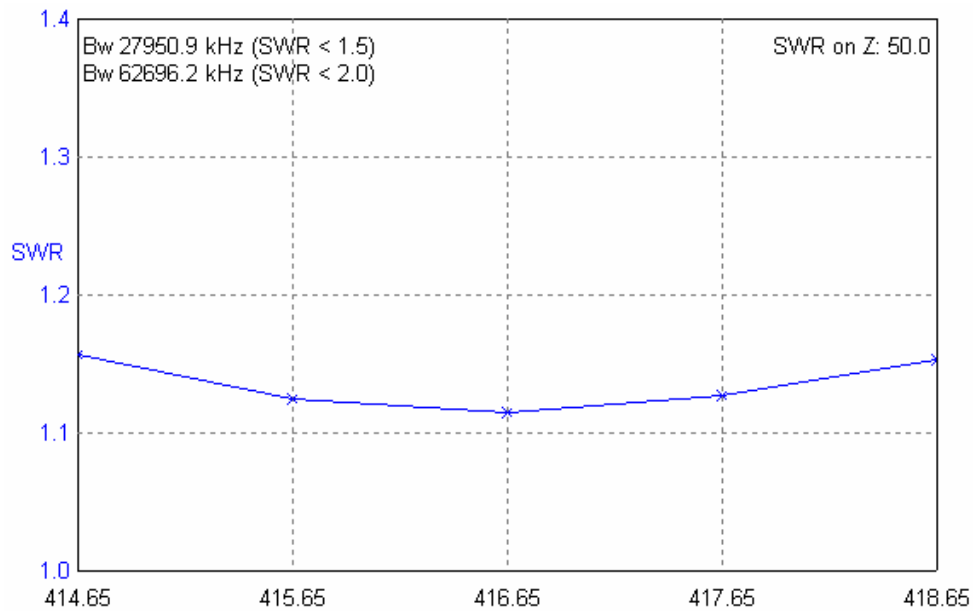


Figura 20. Varredura de Frequência do Modelo Ideal Otimizado.

O melhor ponto de operação desta antena está em 416,65 MHz e analisando o desempenho da antena obtêm-se os resultados representados pela Figura 21 e Tabela 8.

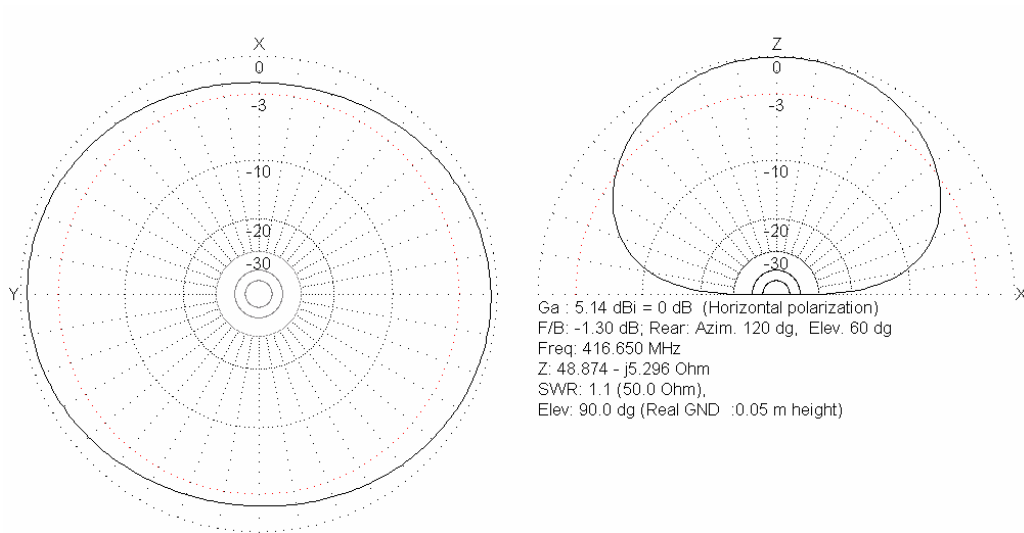


Figura 21. Resultados da Antena Ideal Otimizada no Melhor Ponto de Operação.

Tabela 8 - Resultados da Antena Ideal Otimizada no Melhor Ponto de Operação.

Primeira Antena Para Testes	SWR	R (Ohm)	jX (Ohm)	Ângulo de 1/2 Potência	Ganho (dBi)
Resultados	1,1	48,87	-5,29	104°	5,14

Comparando os resultados obtidos com a antena teste nota-se claramente que o modelo otimizado apresenta um melhor desempenho, tanto para a frequência de 401,65 MHz como no melhor ponto de operação, superando todos os parâmetros analisados como SWR, relação frente-costa, ângulo de meia potência e ganho, porém possui o mesmo erro de dimensionamento, com um perímetro dos bifilares menor do que o ideal para a frequência de 401,65 MHz.

5.3 Modelo Real da Antena Otimizada

Com as mesmas dimensões da antena anterior, mas com uma modificação nas suas dobras, como mostra a Figura 13, repetiu-se o processo realizado anteriormente.

Todos os resultados são mostrados na Figura 22 e Tabela 9.

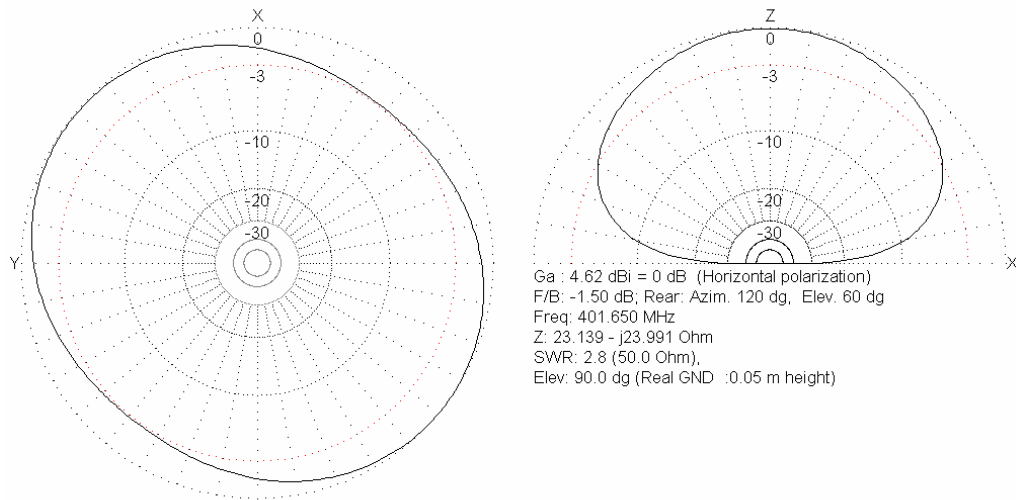


Figura 22. Resultados da Simulação da Antena Real Otimizada.

Tabela 9 - Resultados da Antena Real Otimizada.

Primeira Antena Para Testes	SWR	R (Ohm)	jX (Ohm)	Ângulo de 1/2 Potência	Ganho (dBi)
Resultados	2,8	23,14	-23,99	116°	4,62

Devido aos mesmos problemas verificados anteriormente, foi repetida a varredura de frequência para determinação do melhor ponto de operação da antena, obtendo-se os resultados expressos no gráfico da Figura 23 abaixo.

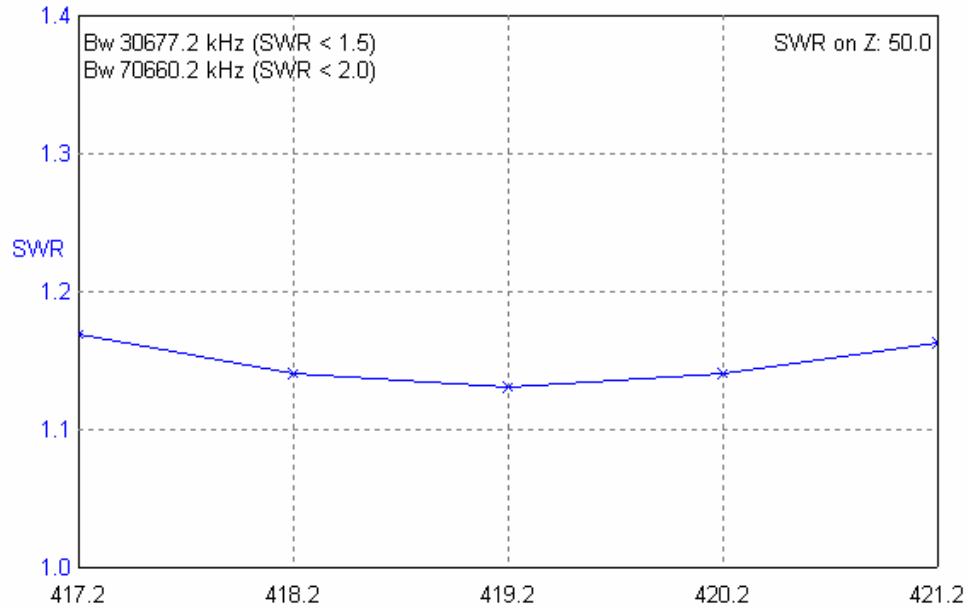


Figura 23. Varredura de Frequência do Modelo Real Otimizado.

Assim, para o melhor ponto de operação verificado, de 419,2 MHz, realizou-se uma nova análise dos parâmetros da antena, com os novos valores mostrados na Figura 24 e Tabela 10.

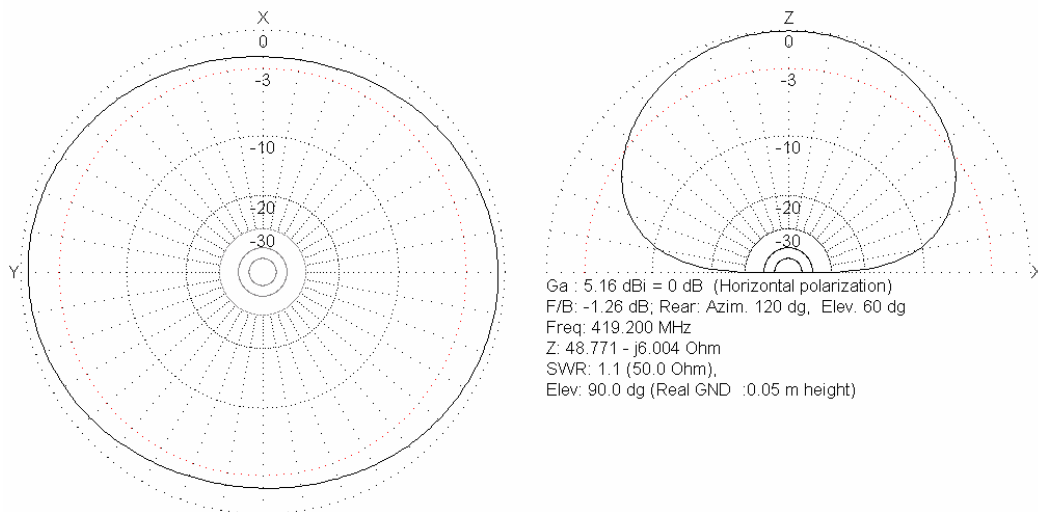


Figura 24. Resultados da Antena Real Otimizada no Melhor Ponto de Operação.

Tabela 10 - Resultados da Antena Real Otimizada no Melhor Ponto de Operação.

Primeira Antena Para Testes	SWR	R (Ohm)	jX (Ohm)	Ângulo de 1/2 Potência	Ganho (dBi)
Resultados	1,1	48,77	-6,00	108°	5,16

A tentativa de aproximar o modelo ideal de antena inicialmente utilizado, em um modelo mais real, teve implicações inesperadas. Para a frequência de 401,65 MHz o modelo real apresentou uma performance pior que a do modelo ideal, com menor ganho e ângulo de meia potência e um maior SWR. No entanto, quando avaliada no seu melhor ponto de operação, ela possui um desempenho melhor nas três qualidades avaliadas anteriormente.

Outra característica analisada permite verificar que o problema do dimensionamento estar sendo feito menor do que o ideal ainda persiste, com um agravamento deste ponto devido ao ajuste da estrutura física da antena, que deve ter aumentado o perímetro dos bifilares.

5.4 Protótipo da Antena Teste

O valor obtido para o SWR apresentou-se muito alto, sendo necessário um casamento de impedância utilizando trimmers. Sabendo que a impedância da antena foi de aproximadamente $31+j78 \Omega$, valor este obtido através da utilização de um analisador de rede, foi possível calcular o valor aproximado das capacitâncias a serem usadas no casamento, obtendo-se a disposição exemplificada na Figura 25.

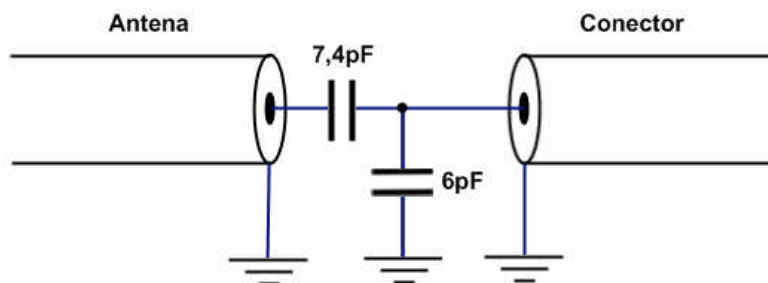


Figura 25. Esquemático do Casamento de Impedâncias.

Após o casamento de impedância utilizando trimmers, realizou-se uma nova análise do SWR, obtendo-se o valor de 1,16, mostrado na Figura 26.

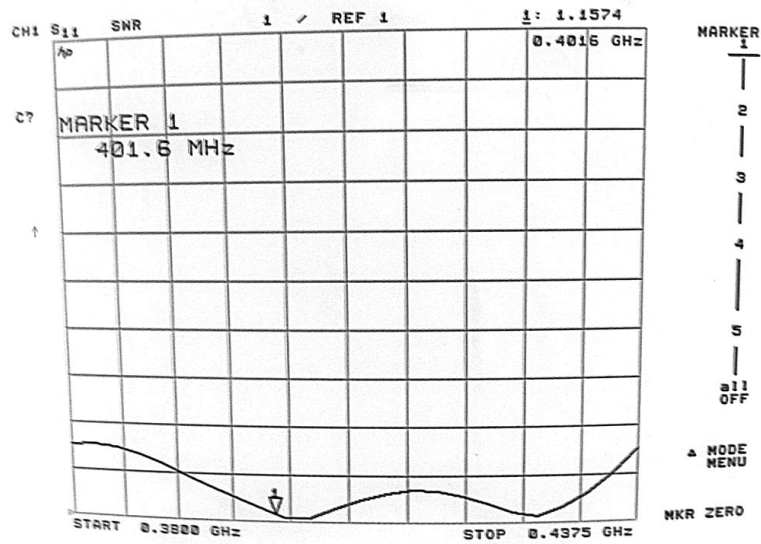


Figura 26. Relação de Onda Estacionária no Analisador de Rede.

Os resultados obtidos não possuem uma garantia de qualidade devido às medidas não terem sido realizadas em um local adequado. Isto se deve à caracterização da antena, em uma câmara anecóica, estar agendada apenas para setembro de 2007, no Laboratório de Integração e Testes (LIT) – INPE.

6. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, concluiu-se que, até o momento, a melhor antena para utilização em satélites, é a antena quadrifilar de meia espira e meio comprimento de onda, que preenche todos os requisitos necessários como estrutura leve e robusta, polarização circular, alta relação frente costa e grande ângulo de meia potência.

Analisando as simulações, nota-se que o dimensionamento fornecido por Bricker e Rickert (1974) está bem próximo do ideal, sendo necessários apenas alguns ajustes no seu comprimento, visto que ajustando a frequência de operação para o valor de menor SWR, obtém-se resultados muito próximos do ideal.

Da mesma forma, o modelo real apresentou desempenho melhor na frequência de operação de menor SWR, e não na desejada, necessitando, portanto, apenas ajustes nas suas dimensões.

A implementação do protótipo não pôde ser aprofundada devido à impossibilidade de caracterização da mesma em local apropriado, porém foi possível um aprendizado da forma de construção e alimentação da antena.

Por fim, a utilização do software MMANA-GAL apresentou-se muito útil ao estudo desejado, fornecendo resultados plausíveis e permitindo maior velocidade de desenvolvimento, facilitando o encaminhamento do projeto. Outro ponto positivo deste software é que pode ser obtido livremente, não adicionando custos ao desenvolvimento da antena.

7. Sugestões

Com base nos resultados obtidos neste estudo, verifica-se que ainda é necessária uma melhor otimização das antenas simuladas, permitindo que o melhor desempenho seja para a frequência de 401,65 MHz, especificada no projeto.

Estudos posteriores têm mostrado que o diagrama ideal deveria apresentar uma maior distribuição de potência nas laterais do diagrama de radiação, como mostrado na Figura 27. Isto é devido ao movimento do satélite, que necessita maior radiação de potência quando se encontra próximo à linha de horizonte da superfície terrestre, ou seja, quando se encontra mais distante das antenas receptoras ou dos PCDs (veja a Figura 28). Um incremento no número de espiras ou uma variação no comprimento da antena podem ser uma alternativa para se obter este novo diagrama de radiação, necessitando assim uma nova pesquisa neste segmento.

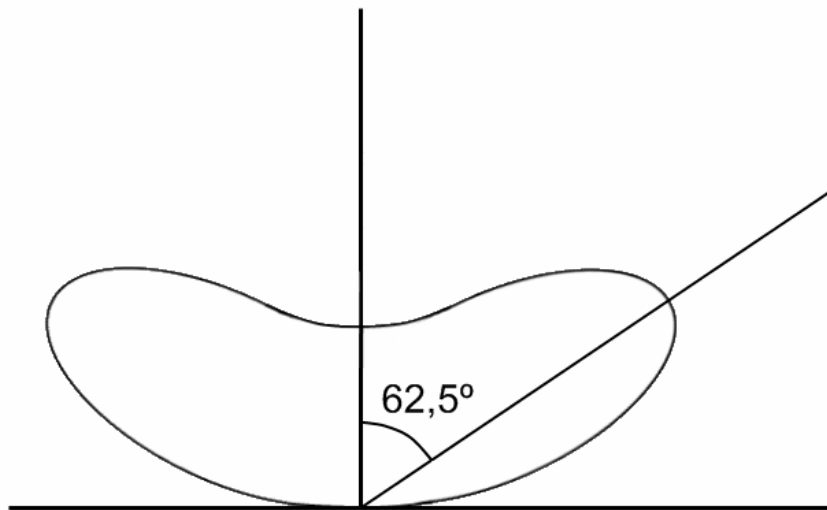


Figura 27. Diagrama de Radiação Com Distribuição Lateral.

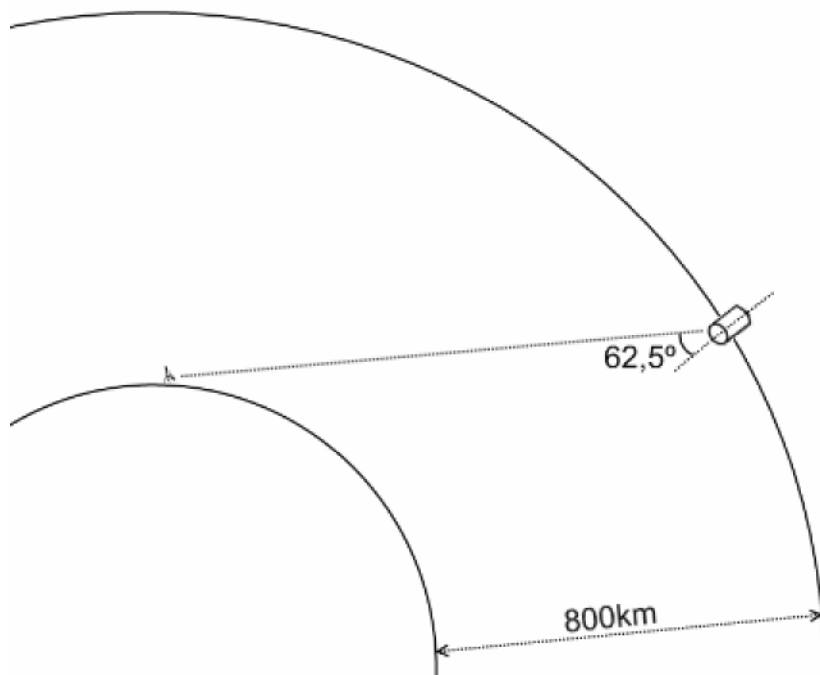


Figura 28. Representação da Órbita do Satélite com Angulação da Distribuição do Diagrama de Radiação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, A. T. (1974). The quadrifilar Helix Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.22, p.173-178.
- AMIN,M.; CAHILL, R. (2005). Bandwidth Limitation of Two-Port Fed and Self-Phased Quadrifilar Helix Antennas. *Micro Wave and Optical Technology Letters*, Vol.46, p.11-15.
- BRICKER, R.; RICKERT, H. (1974). An S-Band Resonant Quadrifilar Antenna for Satellite Communication. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol.12, p.78-82.
- FUSCO, V. F. (2003). Quadrifilar Loop Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.51, p.115-120.
- GONÇALVES, C. A. B.; RODRIGUES, J. A. (2004). Subsistema de Telecomunicações de Serviço para os Satélites Sino Brasileiros CBERS 3&4. XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, SETEMBRO 2004, BELÉM-PA.
- KILGUS, C. (1974). Spacecraft and ground station applications of the resonant quadrifilar helix. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol.12, p.75-77
- MILLIGAN, T. A. (2005). *Modern Antenna Design*. Wiley Interscience. 2nded. IEEE Press.
- YAMAGUTI, W. (2005). Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais. Ministério da Ciência e Tecnologia, INPE. p. 3-4.