

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MEDIDOR DE PLANO DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DE ANTENAS
*MICROSTRIP***

Área de Telecomunicações

por

Gustavo Rossin

Luiz Carlos de Freitas Junior, MSc

Orientador

Itatiba (SP), dezembro de 2006

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MEDIDOR DE PLANO DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DE ANTENAS
*MICROSTRIP***

Área de Telecomunicações

por

Gustavo Rossin

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.

Orientador: Luiz Carlos de Freitas Junior, MSc

Itatiba (SP), dezembro de 2006

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE EQUAÇÕES.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
1.1.1. Objetivo Geral.....	1
1.1.2. Objetivo Específico.....	1
1.2. METODOLOGIA.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DAS ANTENAS.....	4
2.1.1. Diagrama de Radiação.....	4
2.1.2. Intensidade de Radiação.....	5
2.1.3. Eficiência de Radiação.....	6
2.1.4. Diretividade e Ganho.....	7
2.1.5. Área Efetiva Máxima.....	8
2.1.6. Largura de Feixe.....	8
2.1.7. Largura de Banda.....	8
2.1.8. Impedância de Entrada.....	9
2.2. ANTENAS MICROSTRIP.....	10
2.2.1. Aplicações, Vantagens e Desvantagens das Antenas <i>Microstrip</i>.....	12
2.2.2. Tipos de Excitação das Antenas <i>Microstrip</i>.....	14
2.2.3. Antena <i>Microstrip</i> Retangular.....	14
2.2.3.1. Campos Irrradiados para a Antena <i>Microstrip</i> Retangular.....	15
2.2.3.2. Largura e Comprimento da Antena <i>Microstrip</i> Retangular.....	16
2.2.3.3. Condutância de Radiação e Impedância de Entrada.....	17
2.2.3.4. Diretividade.....	18
2.2.3.5. Largura de Banda.....	19
2.2.3.6. Eficiência de Radiação.....	20
2.3. MOTORES DE PASSO.....	20
2.3.1. Introdução.....	20
2.3.2. Tipos de Motores de Passo.....	22
2.3.2.1. Motores de Relutância Variável.....	23
2.3.2.2. Motores de Passo Unipolares.....	24

2.3.2.3. Motores de Passo Bipolares	26
2.3.2.4. Motores Multi-Fases	27
3. PROJETO	29
3.1. BASES DE SUSTENTAÇÃO E HASTES DAS ANTENAS	29
3.2. MOTOR DE PASSO	31
3.3. DRIVER DO MOTOR DE PASSO	32
3.4. MECANISMO DE CONEXÃO DE RF COM ROTAÇÃO DE 360°	35
3.5. ANTENAS MICROFITA RETANGULARES	40
3.6. SOFTWARE DE CONTROLE DO <i>NETWORK ANALYZER</i> HP8712	43
3.7. TESTES FINAIS COM AS ANTENAS <i>MICROSTRIP</i>.	47
4. CONCLUSÃO	50
4.1. TRABALHO DESENVOLVIDO	50
4.2. TRABALHO FUTURO	50
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXO 1. SR-086	52
ANEXO 2. SR-141	53
ANEXO 3. <i>SEMI-RIGID CONNECTORS</i>	54
ANEXO 4. <i>STEP MOTOR M35SP-7</i>	56

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampère
CC	Corrente Contínua
dB	Decibel
Fig.	Figura
GHz	Giga Hertz
GND	<i>Ground</i> (Terra)
HP	<i>Hewlett-Packard</i>
mA	Mili Ampère
MHz	Mega-Hertz
Ω	Omega (ohm)
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
RF	Rádio Frequência
Tab.	Tabela
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
V	Volts
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillators</i>
VDC	Volts Corrente Contínua
VAC	Volts Corrente Alternada
USF	Universidade São Francisco

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistemas de coordenadas para análise de antenas	5
Figura 2.2. Análise da impedância de entrada da antena: (a) Antena no modo transmissor; (b) Equivalente <i>Thevenin</i> para análise da impedância de entrada.....	10
Figura 2.3. Antena <i>microstrip</i> retangular	11
Figura 2.4. Ponto de conexão para casamento de impedância em uma antena <i>microstrip</i>	14
Figura 2.5. Sistemas de coordenadas para antena <i>microstrip</i> retangular.....	15
Figura 2.6. Motor de passo de relutância variável.....	23
Figura 2.7. Motor de passo unipolar.....	24
Figura 2.8. Motor de passo bipolar	26
Figura 2.9. Motor de passo multi-fases.	28
Figura 3.1. Diagrama em blocos do projeto.	29
Figura 3.2. Bases das antenas: (a) Base receptora; (b) Base transmissora.	30
Figura 3.3. Caixa de rolamento: (a) Caixa sem rolamento; (b) Caixa com rolamento e haste.....	30
Figura 3.4. Fotos do motor: (a) Motor de passo; (b) Motor de passo e caixa de redução, integrados.	31
Figura 3.5. Diagrama de Conexão entre ULN2004 e o Motor de Passo.	32
Figura 3.6. Esquema elétrico completo do motor de passo.	33
Figura 3.7. Diagrama da porta Paralela	34
Figura 3.8. Foto do <i>driver</i> do motor de passo confeccionado em PCI.	35
Figura 3.9. Conectores SMB: (a) Adaptador SMA F / SMB M e SMB F vertical; (b) Conexão de ambos.....	35
Figura 3.10. Caixa de redução e motor: (a) Furo de 2,5 mm no eixo da engrenagem da haste; (b) Cabo SR-086 com conectores SMA, após passagem pelo eixo.	36
Figura 3.11. Passagem do cabo SR-086 pelo eixo da engrenagem: (a) Detalhe da passagem do cabo pelo eixo; (b) Conexão do cabo SR-141 e SR-086.....	37
Figura 3.12. Conexão da haste à caixa de redução: (a) Adaptação da haste à engrenagem; (b) Detalhe adaptador: SMB Macho / SMA Fêmea.....	37
Figura 3.13. Resultado do cálculo da linha <i>microstrip</i>	38
Figura 3.14. <i>Layout</i> da placa do mecanismo de conexão 360°.....	39
Figura 3.15. PCI mecanismo de conexão 360°: (a) Vista superior – plano terra; (b) Vista inferior – linha microfita.....	39
Figura 3.16. Montagem da base receptora: (a) Fixação da caixa de redução e motor à base; (b) Fixação da caixa de rolamento e haste à base.	40
Figura 3.17. Finalização montagem: (a) Posicionamento das placas; (b) Montagem finalizada.	40
Figura 3.18. Software <i>Antenas</i> , dimensões.....	41
Figura 3.19. <i>Layout</i> da Antena Microfita.	42
Figura 3.20. Antenas Microfita: (a) Antena TX; (b) Antena RX.	42
Figura 3.21. <i>Software</i> de controle do <i>Network Analyzer</i>	46
Figura 3.22. <i>Setup</i> completo de testes.	47
Figura 3.24. Teste em execução.	47
Figura 3.25. Arquivo gerado pelo instrumento após conclusão do teste.....	48
Figura 3.26. Plano de radiação da antena.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades dos materiais substratos dielétricos.....	11
Tabela 2.2. Seqüência para giro de um motor de relutância variável.....	24
Tabela 2.3. Seqüência para rotação de um motor de passo unipolar com passo completo 1.	25
Tabela 2.4. Seqüência para rotação de um motor de passo unipolar com passo completo 2.	25
Tabela 2.5. Seqüência para rotação de um motor de passo unipolar com meio passo.	26
Tabela 2.6. Seqüência para rotação de um motor de passo bipolar com passo completo 1.	27
Tabela 2.7. Seqüência para rotação de um motor de passo unipolar com passo completo 2.	27
Tabela 2.8. Seqüência para rotação de um motor multi-fases com passo completo 1.	28
Tabela 3.1. Dimensões das bases: transmissora e receptora.....	30
Tabela 3.2. Principais características elétricas do motor de passo M35SP-7.....	31
Tabela 3.3. Diagrama do Cabo de Dados DB-25 / DB-9	34
Tabela 3.4. Características do substrato FR-4 TG150 dupla face com fita condutora de cobre.	38
Tabela 3.5. Informações enviadas a porta paralela.....	43

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	5
Equação 2.2	6
Equação 2.3	6
Equação 2.4	6
Equação 2.5	6
Equação 2.6	6
Equação 2.7	7
Equação 2.8	7
Equação 2.9	7
Equação 2.10	7
Equação 2.11	8
Equação 2.12	8
Equação 2.13	9
Equação 2.14	9
Equação 2.15	9
Equação 2.16	10
Equação 2.17	15
Equação 2.18	16
Equação 2.19	16
Equação 2.20	16
Equação 2.21	16
Equação 2.22	16
Equação 2.23	16
Equação 2.24	17
Equação 2.25	17
Equação 2.26	17
Equação 2.27	17
Equação 2.28	18
Equação 2.29	18
Equação 2.30	18
Equação 2.31	18
Equação 2.32	18
Equação 2.33	19
Equação 2.34	19
Equação 2.35	19
Equação 2.36	19
Equação 2.37	19
Equação 2.38	20
Equação 2.39	20
Equação 2.40	20
Equação 2.41	20

RESUMO

ROSSIN, Gustavo. **Medidor de Plano de Radiação Horizontal de Antenas *Microstrip***. Itatiba, 2006. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2006.

Pretende-se neste relatório, descrever o projeto de um mecanismo capaz de medir o plano de radiação horizontal de antenas de microfitas.

Apresenta-se um estudo teórico de antenas *microstrip* retangulares e motores de passo.

Com o auxílio dos programas: *Antenas* e *Txline* foram projetadas as antenas e as linhas de transmissão do tipo *microstrip* necessárias.

É descrita a implementação de todo mecanismo, assim como o desenvolvimento de um *driver* para o motor de passo, o qual receberá as informações de um *Network Analyzer*, através de sua porta paralela de dados.

Por fim são apresentados os testes realizados com o sistema.

Palavras-chave: Plano de radiação; antenas *microstrip*; linhas de transmissão *microstrip*; *network analyzer*; motor de passo; *driver*.

ABSTRACT

It is intended in this report, to describe the project of a mechanism capable to measure the plan of horizontal irradiation of microstrip antennas.

One presents a theoretical study of antennas, rectangular antennas of microstrip, line and step motors.

With I assist it of the programs: Antenas and Txline will be projected the antennas and the microstrip lines transmissions.

The implementation of all mechanism is described, as well as the development of electrical driver for the step motor, which will receive the information from a Network Analyzer, through its parallel door of data.

Finally the tests are presented that had been carried through.

Keywords: *Plan of irradiation; microstrip antennas; lines of microstrip transmission; network to analyzer; step motor; electrical driver.*

1. INTRODUÇÃO

Devido ao grande crescimento dos sistemas de comunicações nos últimos anos, é notório o empenho dos fabricantes em melhorar os seus módulos constituintes.

Os sistemas de comunicações móveis de rádio frequência, habitualmente, apresentam dois blocos principais: o de banda base onde se efetuam funções de processamento do sinal em baixa frequência e de controle e o de Rádio frequência (RF) que é responsável pela modulação da portadora e transmissão, usando para isso o espaço livre.

A transmissão do sinal já amplificado está a cargo da antena, que deve cumprir um certo número de requisitos consoante o sistema em que estiver integrando.

Uma característica das antenas é o plano de radiação. No presente trabalho, será descrito o desenvolvimento de um mecanismo capaz de medir o plano de radiação de antenas, de forma automatizada.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um mecanismo, almejando transformá-lo em um Kit Didático para escolas técnicas e Universidades, que meça de forma automatizada o nível de RF recebido por uma antena *microstrip* em diversos graus. Para com isso, traçarmos seu diagrama de radiação.

Serão elaboradas duas antenas *microstrip* do tipo retangular, de iguais características. Sendo uma responsável pela radiação do sinal e outra recepção.

1.1.2. Objetivo Específico

Dada as várias etapas do projeto, podemos especificar os objetivos, sendo:

- Elaboração das bases de sustentação das antenas, dando ênfase à base receptora. Esta será dotada de um motor de passo, responsável pelo movimento da antena, em seu eixo;
- Elaboração de um mecanismo que permita captar os sinais recebidos pela antena em movimento, receptora, sem que haja qualquer tipo de cabo que possa enrolar-se em sua haste de sustentação;

- Permitir que o próprio *Network Analyzer*, que irá gerar o sinal de RF aplicado à antena transmissora e que irá medi-lo na antena receptora, controle o motor de passo através de sua porta paralela;
- Desenvolver o software que permita o *Network Analyzer* controlar o motor de passo e realizar as medidas do sinal a cada 6 graus;
- Elaborar as antenas do tipo microfita, com o embasamento teórico e o auxílio do software *Antenas e TxLine*.

1.2. METODOLOGIA

Inicialmente serão trabalhadas as etapas mecânicas e elétricas, por serem com certeza as mais trabalhosas.

Será escolhido o motor de passo a ser usado e como será feita sua conexão com a haste da antena, assim como seu tipo de acionamento, meio passo ou passo completo, dependendo do seu torque e seu ângulo de passo.

Serão confeccionadas duas bases de sustentação para as hastes e antenas, a base receptora e a base transmissora:

- Base transmissora: Será dotada de uma haste fixa que sustentará a antena. Esta estará ligada à porta de saída de RF (RF OUT) do *Network Analyzer*, através de um cabo coaxial.
- Base receptora: Assim como na base transmissora, possuirá uma haste de sustentação da antena, porém, permitindo um movimento de 360° em seu próprio eixo. Movimento este, feito através do motor de passo.

Será desenvolvido um mecanismo que permita a antena girar quantas vezes seja necessário em torno de seu eixo e permita que seu sinal seja captado, sem que haja um cabo coaxial diretamente ligado a ela. Que obviamente enrolar-se-ia na haste.

Na base transmissora, não há a necessidade de tal mecanismo.

Concluindo a etapa, será elaborado o *driver* que acionará o motor de passo. Este deve receber as informações enviadas pela porta paralela do *Network Analyzer*.

Com as etapas mecânicas e elétricas prontas, será desenvolvido o software em linguagem *Basic*, executado pelo *Network Analyzer*. Este deverá acionar o motor de passo, gerar o sinal de RF para a antena transmissora e medir este sinal na antena receptora. Medidas feitas a cada 6 graus de

movimento da antena. Para isso, será utilizada a bibliografia do próprio equipamento, que o acompanha, pois alguns comandos são dedicados e foram desenvolvidos pelo fabricante.

O passo a seguir é o projeto teórico e prático das antenas microfita do tipo retangular, usando como substrato o FR-4 TG150, um composto laminado de fibra de vidro, muito empregado pela indústria nacional na confecção de circuitos que envolvam grande qualidade do projeto.

Na última etapa serão realizados os testes finais, medidas do plano de radiação e finalização da etapa teórica e apresentação do projeto.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Apresenta-se no capítulo 2 os conceitos fundamentais da teoria empregada no trabalho. São abordados os conceitos sobre motores de passo, tais como tipo e acionamento e, principalmente, os conceitos sobre antenas (diagrama de radiação, intensidade de radiação, eficiência de radiação, diretividade e ganho, área efetiva máxima, larguras de banda e de feixe, impedância de entrada). Ainda neste capítulo apresenta-se a antena *microstrip* do tipo retangular ou TM^x_{010} .

No capítulo 3, apresenta-se o projeto em si, onde são detalhados os passos de sua realização. Desenvolvimento das estruturas mecânicas, *driver* do motor de passo, mecanismo de conexão 360° com a antena (este permite que o sinal recebido pela antena seja medido, sem que haja qualquer cabo conectado a ela, que possa enrolar-se em sua haste de sustentação), antenas *microstrip*, com o auxílio dos *Softwares Antenas e TxLine*, por último o desenvolvimento do *software* em linguagem *Basic*, que será responsável pelo controle do motor de passo e das medidas realizadas pelo *Network Analyzer*.

Para finalizar, apresentam-se no capítulo 4 as conclusões sobre o trabalho, assim como sugestões para a continuação do mesmo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão descritas neste capítulo, as fundamentações teóricas referentes a antenas, antenas *microstrip* do tipo retangular, motores de passo.

2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DAS ANTENAS

Pode-se definir uma antena com um dispositivo usualmente metálico encarregado de irradiar ou receber ondas de rádio que se propagam em um determinado meio, ou segundo os termos técnicos para antenas, define-se como uma estrutura entre o espaço livre e uma estrutura guiada, capaz de transformar uma onda eletromagnética guiada em onda eletromagnética radiada, ou vice-versa. A antena transmissora ou radiadora e a antena receptora são basicamente iguais. Uma base de estudo das antenas é a teoria eletromagnética, a partir da qual pode-se resolver os problemas de antenas em detalhes.

Para se descrever o desempenho de uma antena, são necessárias definições de vários parâmetros. Neste capítulo serão abordados os seguintes parâmetros de antenas: Diagrama de radiação, intensidade de radiação, eficiência de radiação, diretividade e ganho, larguras de banda e de feixe, área efetiva máxima e impedância de entrada.

2.1.1. Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação pode ser definido como a representação gráfica em três dimensões das propriedades de radiação de uma antena em função das coordenadas espaciais conforme mostrado na Figura 2.1. Na maioria dos casos o diagrama de radiação é determinado para a região de campo distante. O desempenho da antena é descrito em função do diagrama de radiação bidimensional segundo alguns planos principais.

Os diagramas de radiação podem ser de três tipos: isotrópico, direcional e omini-direcional. Um irradiador isotrópico é definido como uma antena sem perdas tendo radiação uniforme em todas as direções, uma antena direcional tem a propriedade de irradiar ou receber ondas eletromagnéticas mais eficientemente em determinadas direções do que em outras, o diagrama omini-direcional é definido como sendo um digrama essencialmente não direcional em um dado plano (neste caso o plano azimutal) e um diagrama direcional em algum plano ortogonal (neste caso o plano de elevação), o diagrama omini-direcional é um tipo especial de diagrama direcional.

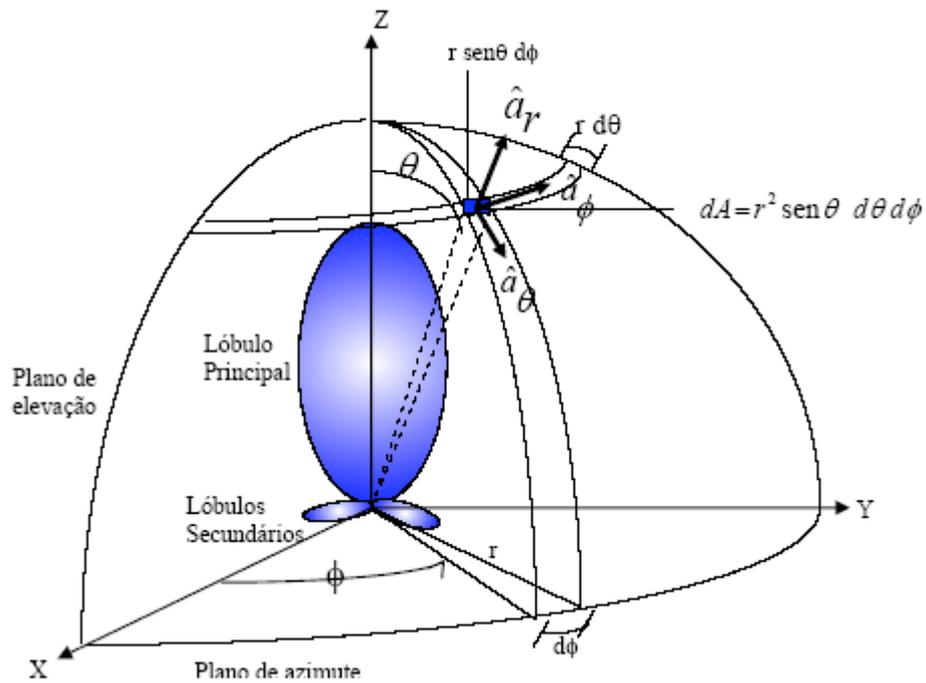


Figura 2.1. Sistemas de coordenadas para análise de antenas

O diagrama de radiação mostra a distribuição espacial do campo, o comportamento da distribuição de potência ao longo da antena para o meio externo, pode assim definir outros conceitos que auxiliam no entendimento dessas estruturas, como diretividade, ganho, eficiência da antena, largura de feixe de meia potência, etc. Para uma antena polarizada linearmente, seu desempenho é descrito em termos dos principais planos E e H . o plano- E contém o vetor campo elétrico na direção de máxima radiação, e o plano- H contém o vetor campo magnético na direção de máxima radiação.

2.1.2. Intensidade de Radiação

A intensidade de radiação é definida como sendo a relação entre a potência radiada por uma antena por unidade de ângulo sólido e a potência total radiada pela antena.

$$U(\theta, \phi) = \frac{4\pi \text{ potência irradiada por unidade de ângulo sólido na direção } \theta, \phi}{\text{potência total irradiada pela antena}} \quad \text{Equação 2.1}$$

A intensidade de radiação é também determinada para zonas distantes em função do campo elétrico de uma antena por:

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2\eta} |\vec{E}(r, \theta, \phi)|^2 \quad \text{Equação 2.2}$$

Sendo: $U(\theta, \phi)$ - Intensidade de radiação (W / unidade de ângulo sólido);

$|\vec{E}(r, \theta, \phi)|$ - Módulo do vetor campo elétrico em função das coordenadas espaciais;

η - Impedância intrínseca do meio.

A potência total radiada é obtida pela integração da intensidade de radiação sendo dado por:

$$P_{irrad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \quad \text{Equação 2.3}$$

Sendo: $d\Omega$ - elemento de ângulo sólido = $\sin \theta d\theta d\phi$

2.1.3. Eficiência de Radiação

A eficiência de radiação de uma antena (ϵ_{irrad}) é a relação entre a potência radiada pela antena (P_{irrad}) e a potência total na entrada da antena ($P_{irrad} + P_{dis}$):

$$\epsilon_{irrad} = \frac{P_{irrad}}{(P_{irrad} + P_{dis})} \quad \text{Equação 2.4}$$

Sendo: P_{dis} - é a potência dissipada devido as perdas ôhmicas ou dielétricas.

A eficiência de radiação da antena pode ser dada em função da resistência de radiação (R_{ir}) e da resistência de perda (R_p) da antena, sendo:

$$\epsilon_{irrad} = \frac{R_{ir}}{(R_{ir} + R_p)} \quad \text{Equação 2.5}$$

A resistência de perda de uma antena dipolo (exemplo), considerando-se a distribuição de corrente é dada por:

$$R_p = \frac{l}{P} R_s = \frac{l}{P} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}} \quad \text{Equação 2.6}$$

Sendo: P - Perímetro da seção transversal do fio ($P=2\pi a$);

a - Raio do fio condutor;

R_s - resistência superficial do condutor;

l - Comprimento do dipolo;

$\omega = 2\pi f$ - Frequência angular;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (H / m)$ - Permeabilidade do espaço livre;

σ - Condutividade do metal.

2.1.4. Diretividade e Ganho

A diretividade é definida como sendo a máxima intensidade de radiação em uma dada direção da antena, sobre a intensidade de radiação média em todas as direções. A intensidade de radiação média é igual a potência radiada pela antena dividida por 4π . Portanto, tem-se:

$$D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{irrad}}} \quad \text{Equação 2.7}$$

Sendo: U_{\max} - Intensidade de radiação máxima;

U_0 - Intensidade de radiação de uma antena isotrópica.

Uma outra medida usual que descreve a desempenho da antena é o ganho. Sendo definido como a relação entre a densidade de radiação em uma dada direção do espaço a potencia total na entrada da antena, isto é:

$$G = 4\pi \frac{\text{Intensidade de irradiação}}{\text{Potência total de entrada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{ent}}} \quad \text{Equação 2.8}$$

A potência total é dada em função da eficiência de radiação e da potencia total de entrada, sendo:

$$P_{\text{irrad}} = \varepsilon_{\text{irrad}} \cdot P_{\text{ent}} \quad \text{Equação 2.9}$$

O ganho Maximo G , ou simplesmente ganho da antena pode ser dado também pelo produto entre a diretividade e a eficiência da antena:

$$G(\theta, \phi) = \varepsilon_{\text{irrad}} D_0 = \varepsilon_{\text{irrad}} \left[4\pi \frac{U_{\max}(\theta, \phi)}{P_{\text{irrad}}} \right] \quad \text{Equação 2.10}$$

2.1.5. Área Efetiva Máxima

A área efetiva máxima ou área da abertura de uma antena é definida como a área de uma antena ideal sem perdas que absorveria a mesma potência de uma onda plana incidente na antena. Sob condições de polarização casada, a área efetiva máxima é dada por:

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 \quad \text{Equação 2.11}$$

Sendo: λ - Comprimento de onda da frequência de operação.

Considerando-se as perdas associadas à antena, a área efetiva máxima pode ser escrita levando-se em conta a eficiência de radiação da antena, conforme segue:

$$A_{em} = \varepsilon_{irrad} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) D_0 \quad \text{Equação 2.12}$$

2.1.6. Largura de Feixe

A largura de feixe (LF) é uma figura de mérito importante, sendo definida como a largura angular do lóbulo principal do diagrama de radiação. Quando a largura de feixe aumenta, o nível do lóbulo secundário diminui e vice-versa. Largura de feixe de meia potência ($LFMP$), ou largura de feixe de 3dB é a largura angular medida entre os pontos que estão 3dB abaixo do valor máximo do lóbulo principal.

2.1.7. Largura de Banda

Pode-se definir largura de banda (LB) de uma antena para a faixa de frequências na qual ela opera satisfazendo determinados critérios. Dependendo das necessidades de operação do sistema, a largura de banda será limitada por um ou vários parâmetros tais como: impedância de entrada, ganho, largura de feixe, posição do lóbulo principal, nível dos lóbulos secundários e polarização. A largura de banda pode ser dada de três formas:

- a) Forma percentual, quando a largura de banda é em menor que a frequência central, conforme:

$$LB = 100 \cdot \left(\frac{f_s - f_i}{f_c} \right) \quad \text{Equação 2.13}$$

b) Pelo relacionamento entre as frequências: superior ou inferior conforme, quando a frequência superior for maior ou igual ao dobro da frequência inferior, tem-se:

$$LB = \frac{f_s}{f_i} \quad \text{Equação 2.14}$$

c) Ou em função do fator de qualidade total da antena e do VSWR, conforme:

$$LB = 100 \cdot \frac{(VSWR - 1)}{Q_t \cdot \sqrt{VSWR}} \quad \text{Equação 2.15}$$

Sendo: f_s - frequência superior;

f_i - frequência inferior;

f_c - frequência central;

Q_t - fator de qualidade total da antena;

$VSWR$ - coeficiente de onda estacionária.

2.1.8. Impedância de Entrada

A impedância de entrada da antena é definida como sendo a impedância apresentada nos terminais da antena, ou seja, é a impedância apresentada à linha de transmissão ou à estrutura de casamento através da qual ela é alimentada. E pode ser definida como a razão entre a tensão e a corrente nos terminais da antena.

A análise da impedância de entrada da antena pode ser feita a partir da Figura 2.2.

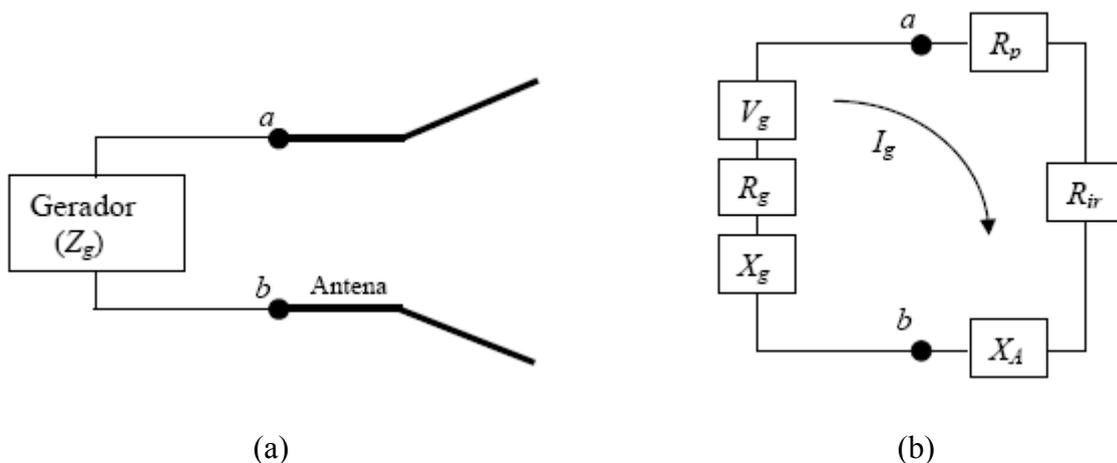


Figura 2.2. Análise da impedância de entrada da antena: (a) Antena no modo transmissor; (b) Equivalente *Thevenin* para análise da impedância de entrada.

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} \text{ ou } Z_A = R_A \pm jX_A, \text{ sendo } R_A = R_{ir} + R_p \quad \text{Equação 2.16}$$

Sendo: Z_A – Impedância da antena nos terminais a-b; (ohms)

V_A – Tensão na entrada dos terminais a-b (volts)

$I_A = I_g$ – Corrente que percorre o circuito (Gerador + Antena)

R_A – Resistência da antena nos terminais a-b; (ohms)

X_A – Reatância da antena nos terminais a-b; (ohms)

R_{ir} – Resistência de radiação da antena; (ohms)

R_p – Resistência de perda da antena. (ohms)

Z_g – Impedância do gerador (ohms)

R_g – Resistência do gerador (ohms)

X_g – Reatância do gerador (ohms)

2.2. ANTENAS MICROSTRIP

O desenvolvimento das antenas *microstrip* de baixo perfil utilizadas frequentemente em veículos de alta velocidade, tais como aviões, mísseis, *aircrafts*, espaçonaves entre outros, teve grande aceitação, devido a seu baixo peso, custo e tamanho reduzidos, possuindo alto desempenho e facilidade na instalação. As maiores desvantagens são quanto a sua eficiência, que é baixa, e a estreita largura de faixa de frequência de operação.

Uma antena *microstrip* consiste basicamente de duas placas condutoras, paralelas, separadas por um substrato dielétrico, sendo uma das placas o elemento irradiante e a outra o plano de terra, conforme mostrado na Figura 2.3. A placa irradiante pode assumir qualquer formato, mas normalmente são utilizadas formas convencionais, para simplificar a análise de suas características de radiação. O elemento irradiante da antena *microstrip* consiste de uma placa metálica *patch* de espessura ($t \ll \lambda$) espaçada a uma pequena fração de um comprimento de onda ($h \ll \lambda$) acima de um plano de terra, onde ($t \ll h$). Os elementos *microstrip* e suas linhas de alimentação são impressos na mesma face do material substrato dielétrico. Há várias formas de se alimentar uma antena *microstrip*, as mais utilizadas são as fitas condutoras de pequena largura e os cabos coaxiais. Arranjos de elementos *microstrip* podem ser utilizados para se obter uma maior diretividade.

Os materiais condutores geralmente utilizados são o cobre e o ouro, enquanto que os materiais mais usados como substrato dielétrico são a alumina e as fibras texturizadas com teflon. A Tabela 2.1 mostra as propriedades de alguns substratos dielétricos.

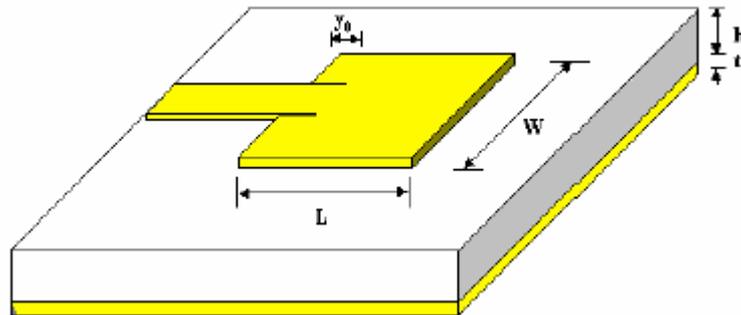


Figura 2.3. Antena *microstrip* retangular

Tabela 2.1. Propriedades dos materiais substratos dielétricos.

Material não cerâmico	ϵ_r (Banda X)	Tang. Perda (Banda X)
PTFE Não Reforçado	2,10	0,0004
PTFE c/ Fibra de Vidro	2,33	0,0015
Teflon	2,08	0,00037
CuFlon	2,10	0,004
RT / Duroid 5880	2,20	0,0009
RT / Duroid 5870	2,33	0,0012
RT / Duroid 6002	2,94	0,0012

RT / Duroid 6006	6,15	0,0019
RT / Duroid 6010LM	10,2	0,0023
ULTRALAM 2000	2,50	0,0019
TMM 3	3,27	0,0020
TMM 4	4,50	0,0020
TMM 6	6,00	0,0023
TMM 10	9,20	0,0023
TMM 10i	9,80	0,0020
RO 3003	3,00	0,0013
RO 3006	6,15	0,0025
RO 3010	10,2	0,0035
RO 4003	3,98	0,0027
RO 4350	3,48	0,0040
Material Cerâmico	ϵ_r (Banda X)	Condut. do Dielétrico
Sílica Fundida	3,78	0,00021
BeO – Óxido de Berílio	6,80	0,00039
GaAs – Arseneto de Gálio	13,0	0,0080

2.2.1. Aplicações, Vantagens e Desvantagens das Antenas *Microstrip*.

a) Aplicações:

As antenas *microstrip* possuem várias aplicações nos diversos campos, dentre as quais pode-se citar:

- Comunicações por satélite;
- Radares Doppler e outros;
- Rádio - altímetros;
- Comando e controle;
- Telemetria de Mísseis;
- Veículos de alta velocidade (aviões, foguetes, etc.);
- Navegação por recepção via satélite;
- Elementos de alimentação em antenas complexas.

b) Vantagens:

As antenas *microstrip* apresentam grandes vantagens em relação as antenas convencionais de microondas e grande variedade de aplicações em frequências que variam de 100 MHz a 50GHz.

Algumas das principais vantagens das antenas *microstrip* em relação as convencionais são:

- Baixo peso e pequeno volume;
- Baixo perfil planar, podendo adaptar-se a estruturas de diversas formas;
- As antenas podem ser facilmente montadas em mísseis, foguetes e satélites;
- Baixo custo;
- Podem ser facilmente fabricadas para operar em duas frequências;
- Simplicidade de fabricação;
- São compatíveis com dispositivos modulares (dispositivos de estado sólido, como: amplificadores, osciladores, atenuadores variáveis, chaves, moduladores, *mixers*, etc. podendo estes, serem montados no próprio substrato da antena);
- Facilidade de integração com outros dispositivos;
- Possibilidade de obtenção de polarização linear e circular com uma simples modificação da posição do ponto de alimentação.

c) Desvantagens

Contudo, as antenas *microstrip* apresentam algumas desvantagens comparadas com as antenas convencionais, sendo algumas:

- Largura de banda estreita;
- Baixa eficiência;
- Ganho limitado, máximo ~ 20dB;
- Radiação em apenas um hemisfério;
- Irradiações indesejáveis das alimentações, junções e ondas superficiais;
- Baixa capacidade de potência.

Há várias maneiras de se diminuir substancialmente algumas dessas desvantagens. Por exemplo, maior largura de faixa e eficiência, que podem ser alcançadas com a utilização de substratos de pouca espessura e de baixo valor de permissividade dielétrica. Também podem ser minimizadas as excitações de ondas superficiais, através de um projeto criterioso da antena.

2.2.2. Tipos de Excitação das Antenas *Microstrip*

As antenas *microstrip* possuem seus elementos irradiantes num dos lados do substrato dielétrico e assim podem ser alimentadas por linhas *microstrip*, cabos coaxiais, ou por acoplamento eletromagnético.

A excitação das antenas *microstrip* por linhas *microstrip* apresenta como principal vantagem o fato de poder ser impressa no mesmo plano da antena conforme mostra a Figura 2.3. A desvantagem deste método diz respeito à alta impedância de radiação nas bordas da antena *microstrip*. Pode-se alimentar uma antena *microstrip* através de um cabo coaxial conectado a um ponto escolhido da antena. Para se fazer o casamento do sistema, liga-se à malha condutora do cabo coaxial ao plano de terra da microfita e o condutor central no elemento irradiante da antena, conforme mostra a Figura 2.4. Apesar da facilidade da conexão para um único circuito impresso, este método apresenta dificuldades na sua fabricação e instalação quando se têm mais de um elemento irradiador.

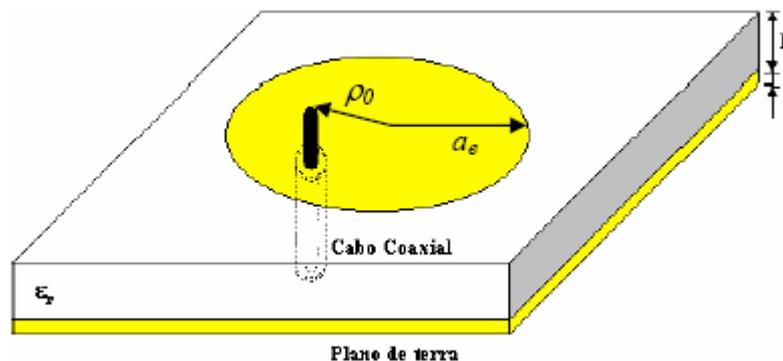


Figura 2.4. Ponto de conexão para casamento de impedância em uma antena *microstrip*

2.2.3. Antena *Microstrip* Retangular

Conforme descrito anteriormente, uma antena *microstrip* consiste de dois planos condutores separados por um substrato dielétrico fino. A placa inferior funciona como um plano de terra e a superior é o elemento irradiante da antena, conforme mostra a Figura 2.3, sendo impresso juntamente com o material dielétrico associado a sua alimentação. Pode-se alimentar uma antena *microstrip* retangular de várias formas. Neste trabalho apresentam-se as alimentações através linha *microstrip* e cabos coaxiais de 50 ohms.

2.2.3.1. Campos Irrradiados para a Antena *Microstrip* Retangular

Os campos nas aberturas das duas fendas (*slots*) formam, pode-se assim dizer, um arranjo com dois elementos afastados de $\frac{1}{2}$ comprimento de onda guiado ($\lambda_g/2$). Os quais adicionam-se em fase e possuem uma radiação máxima normal ao elemento da microfita. As componentes dos campos nas terminações das faces da placa podem ser decompostas em componentes normais e tangenciais ao plano de terra. Como o comprimento da placa é de aproximadamente meio comprimento de onda, as componentes normais dos campos de borda estão fora de fase e suas contribuições cancelam-se mutuamente na direção *broadside* normal à placa. Porém, as componentes tangenciais estão em fase, fazendo com que o campo distante seja máximo na região normal à estrutura. A análise desta região normal pode ser feita a partir da Figura 2.5.

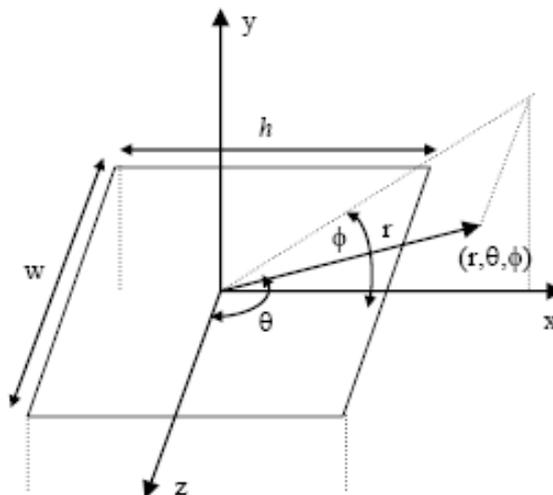


Figura 2.5. Sistemas de coordenadas para antena *microstrip* retangular.

O modo de excitação da abertura da Figura XX ao longo do eixo x , é o $TM^{x_{010}}$, sendo a componente do campo elétrico da antena *microstrip* dada por:

$$E\phi = +j \frac{kWhE_0 e^{-jkr}}{\pi r} \left\{ \text{sen}\theta \left[\frac{\text{sen}(X)}{X} \right] \left[\frac{\text{sen}(Z)}{Z} \right] \right\} \cos\left(\frac{kL_2}{2} \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi\right) \quad \text{Equação 2.17}$$

Sendo: $\cos\left[\left(L_e/2\right) \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi\right]$ - fator do arranjo para os dois *slots*.

$$X = \frac{kh}{2} \text{sen}\theta \cdot \cos\phi \quad \text{e} \quad Z = \frac{kW}{2} \cos\theta \quad \text{Equação 2.18}$$

Sendo: L_e - Comprimento efetivo da antena;

W - Largura da antena *microstrip* retangular;

h - Altura do substrato dielétrico;

$k = 2\pi / \lambda$ - Constante de fase ou comprimento elétrico.

Plano - E ($\theta = 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ e $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$):

$$E_{\phi E} \cong +j \frac{kWhE_0 e^{-jKr}}{\pi r} \left[\text{sen} \left(\frac{\frac{kh}{2} \cos\phi}{\frac{kh}{2} \cos\phi} \right) \right] \cos \left(\frac{kL_e}{2} \text{sen}\phi \right) \quad \text{Equação 2.19}$$

Plano - H ($\phi = 0^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$):

$$E_{\phi H} \cong +j \frac{kWhE_0 e^{-jKr}}{\pi r} \left[\text{sen}\theta \left(\frac{\text{sen} \left(\frac{kh}{2} \text{sen}\theta \right)}{\frac{kh}{2} \text{sen}\theta} \right) \left(\frac{\text{sen} \left(\frac{kW}{2} \cos\theta \right)}{\frac{kW}{2} \cos\theta} \right) \right] \quad \text{Equação 2.20}$$

2.2.3.2. Largura e Comprimento da Antena *Microstrip* Retangular

A largura (W) e o comprimento (L) do elemento *microstrip* retangular são fornecidos por:

$$W = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad \text{Equação 2.21}$$

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_0 \sqrt{\epsilon_e}} = -2\Delta l \quad \text{Equação 2.22}$$

$$L_e = L + 2\Delta l \quad \text{Equação 2.23}$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{2} \left\{ \varepsilon_r + 1 + (\varepsilon - 1) \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1/2} \right\} \quad \text{Equação 2.24}$$

Sendo: c - Velocidade da luz no vácuo;

f_0 - Frequência de operação;

ε_r - Constante dielétrica relativa do substrato dielétrico;

ε_e - Constante dielétrica efetiva do substrato dielétrico;

L_e - Comprimento efetivo da antena *microstrip*;

Δl - Fator de correção do comprimento atual.

2.2.3.3. Condutância de Radiação e Impedância de Entrada

A condutância de radiação (G_1) para uma fenda (*slot*) simples pode ser obtida usando um procedimento similar ao da resistência de radiação de um elemento linear, sendo dada por:

$$G_1 = \frac{2P_{irrad}}{|V_0|^2} = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad \text{Equação 2.25}$$

A solução da corrente (I_1), pode ser feita pelo método do trapézio ou pela aproximação. Sendo Si – Seno integral. A impedância de entrada ressonante da antena *microstrip* retangular, para o modo TM_{010} , contendo duas fendas, e alimentada por uma linha *microstrip* é dada por:

$$I_1 = \int_0^\pi \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{kW}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right]^2 \text{sen}^3 d\theta = -2 + \cos(kW) + kW Si(kW) + \frac{\text{sen}(kW)}{kW} \quad \text{Equação 2.26}$$

A impedância de entrada ressonante da antena retangular, para o modo TM_{010} , contendo duas fendas e alimentada por uma linha *microstrip* é dada por:

$$R_{ent} = \frac{1}{2(G_1 + G_2)} \quad \text{Equação 2.27}$$

Sendo, G_{12} dado por:

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\text{sen}\left(\frac{kW}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(kL\text{sen}\theta) \text{sen}^3\theta d\theta \quad \text{Equação 2.28}$$

A impedância de ressonância da antena *microstrip* retangular alimentada por uma fita condutora em um determinado ponto (y_0), ao longo do comprimento (L) é dada por:

$$R_{ent(\text{Re}ssonante)} = R_{ent} \cos^2(\pi y_0 / L) \quad \text{Equação 2.29}$$

Caso a antena *microstrip* seja alimentada por um cabo coaxial de 50Ω , a impedância de entrada dependerá do comprimento elétrico da estrutura - $l \beta$, onde o casamento será verificado a partir da localização do alimentador até a borda do elemento *microstrip* retangular.

$$R_{ent} = \frac{(120\lambda_0)^2 + \left(\frac{377t}{W\sqrt{\epsilon_r}}\right)^2 \left(\frac{\tan^2 \beta l + \tan^4 \beta l}{1 + \tan^2 \beta l}\right)}{240W\lambda_0(1 + \tan^2 \beta l)} \quad \text{Equação 2.30}$$

2.2.3.4. Diretividade

A diretividade para cada fenda da microfita é dada por:

$$D_0 = \frac{4\pi U \max}{P_{irrad}} = \left(\frac{2\pi W}{\lambda_0}\right)^2 \frac{1}{I_1} \quad \text{Equação 2.31}$$

A diretividade das duas fendas (*slots*) da antena *microstrip* retangular é dada por:

$$D_2 = D_0 D_{AF}, \text{ sendo } D_{AF} = \frac{2}{1 + g_{12}} \quad \text{Equação 2.32}$$

Sendo: D_{AF} – Diretividade do fator do arranjo;

g_{12} – Condutância mutua normalizada = G_{12}/G_1 .

2.2.3.5. Largura de Banda

Uma das maiores limitações de uma antena *microstrip* é a estreita largura de banda. Usualmente ela varia de 1% a 4%. Para se encontrar a largura de banda tem-se que:

Para $W/h > 1$, a impedância característica é dada por:

$$Z_0 = \frac{\left(\frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e}} \right)}{\left(\frac{h}{W} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right)}$$

Equação
2.33

Para $W/h < 1$, a impedância característica é dada por:

$$Z_0 = \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \right) \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right)$$

Equação
2.34

Considerando-se as perdas do condutor, do dielétrico e da energia radiada, tem-se que os respectivos fatores de qualidade são dados por:

Fator de qualidade do condutor:

$$Q_c = h \sqrt{\pi \mu_0 f_0 \sigma}$$

Equação
2.35

Fator de qualidade para o substrato dielétrico, devido a tangente de perda do material:

$$Q_d = 1 / \tan \delta$$

Equação
2.36

Fator de qualidade devido à energia radiada:

$$Q_r = \frac{Z_0}{\left(480\pi \left(\frac{h}{\lambda_0} \right)^2 F \right)}$$

Equação
2.37

$$F = \left(\frac{\epsilon_e + 1}{\epsilon_e} \right) \left(\frac{(\epsilon_e - 1)^2}{2\sqrt{\epsilon_e^3}} \right) \ln \left(\frac{\sqrt{\epsilon_e} + 1}{\sqrt{\epsilon_e} - 1} \right)$$

Equação
2.38

O fator de qualidade total (Q_t), é dado por:

$$1/Q_t = 1/Q_d + 1/Q_c + 1/Q_r$$

Equação
2.39

Sendo a largura de banda da antena *microstrip* retangular ou circular dada por:

$$LB = 100 \frac{(VSWR - 1)}{Q_t \sqrt{VSWR}}$$

Equação
2.40

2.2.3.6. Eficiência de Radiação

A eficiência de radiação da antena *microstrip* retangular ou circular é dada por:

$$\epsilon_{irrad} (\%) = 100 \frac{Q_c}{Q_c + Q_d + Q_r}$$

Equação
2.41

2.3. MOTORES DE PASSO

2.3.1. Introdução

A crescente popularidade dos motores de passo se deve à total adaptação desses dispositivos à lógica digital. Vários periféricos de computadores os usam em inúmeras aplicações, como mesas gráficas, unidades de disco, *plotters* e etc. Não só na Informática, mas também na Robótica esses motores estão sendo cada vez mais usados, em sistemas de movimentação de braços mecânicos e etc. Com o auxílio desses motores podem-se criar interfaces entre o cérebro (CPU) e o movimento mecânico, constituindo, em suma, a chave para a Robótica.

Os motores comuns giram em velocidade constante, pois possuem apenas dois estágios de operação, ou seja, parados ou girando; enquanto os motores de passo deslocam-se por impulsos ou passos discretos e exibem três estágios: parados, ativados com rotor travado (bobinas energizadas)

ou girando em etapas. Este movimento pode ser brusco ou suave, dependendo da frequência e amplitude dos passos em relação à inércia em que ele se encontre.

Pertencendo a uma categoria separada, diferente dos motores comuns, os motores de passo têm aplicações específicas, ou seja, em rotações de eixos em um ou vários passos, dependendo de sinais fornecidos pelos circuitos digitais de comando. Podem ser usados em circuitos abertos, ou seja, sem qualquer realimentação de controle normalmente proporcionada por potenciômetros, codificadores, geradores tacométricos e assim por diante, evitando com isso, os problemas encontrados nesses sistemas, como instabilidade e ultrapassagem (*overshoot*), podendo substituir os servos-motores CC convencionais.

No que se refere ao funcionamento, os motores de passo podem ser comparados aos síncronos, ou seja, um campo rotativo (nesse caso gerados pela eletrônica de controle) faz girar um rotor magnético. Tais motores foram subdivididos de acordo com a forma em que é gerado o campo rotativo (enrolamento unipolar ou bipolar no estator) e com o material empregado na confecção do rotor. Os mais usados são os unipolares, geralmente com quatro bobinas. Neles, cada fase consiste de um enrolamento com derivação central, ou mesmo de dois enrolamentos separados, de forma que o campo magnético possa ser invertido sem a necessidade de se inverter o sentido da corrente.

Os motores bipolares, como possuem muitas bobinas na mesma carcaça e por isso essas têm fios mais finos ou menor número de espiras, desenvolvem momentos inferiores aos dos bipolares, porém possuem uma resolução maior, isso é, maior número de passos por volta completa. A máxima frequência de rotação é limitada pelo rotor magnetizado, que induz uma tensão no estator. Desse modo, motores com velocidades relativamente elevadas usam, normalmente, rotores de ferro doce, unipolares e com menos pólos que o estator.

Os enrolamentos são ligados em seqüência, às vezes em grupos. A escolha de um motor de passo recai, em primeiro lugar, sobre os requisitos mecânicos; as características elétricas, por sua vez, determinam o projeto da eletrônica de controle. Parâmetros de grande importância, a taxa de arranque é a máxima aceleração permitida de operação, intimamente relacionada com o momento de inércia do rotor. Na prática, deve-se ter em mente que o momento de inércia aumenta com a inércia das partes girantes acopladas ao motor, reduzindo, portanto, a taxa de arranque.

Os motores de passo unipolares são controlados facilmente através de um transistor apenas por enrolamento, enquanto nos bipolares são necessários quatro transistores em ponte. É possível, nesse segundo, utilizar-se apenas dois transistores por enrolamento, desde que a fonte seja simétrica, o que complicaria um pouco o circuito. Mas, em ambos os casos, uma lógica de controle é exigida para que o motor possa girar corretamente.

Caso pretenda-se controlar o motor de passo por computador, os estágios excitadores poderão ser acoplados diretamente a um dos conectores de saída, deixando para o software a tarefa de estabelecer os movimentos do motor, ou seja, sentido de rotação (horário / anti-horário), em passos inteiros ou meio passos e a variação dos tempos entre os passos, que definirá a precisa regulação da velocidade. Pela contagem do número de passos, será possível seguir continuamente a posição do objeto acionado pelo motor.

O uso de motores de passo exige o respeito a algumas regras básicas. É preciso levar em conta o caráter indutivo do estator, cuja corrente, ao ser chaveada, gera uma tensão indutiva que chega a ser elevada o bastante para destruir a eletrônica de controle. Isso pode ser evitado com a utilização de diodos de proteção, nos enrolamentos unipolares, e varistores ou diodos zener ligados em anti-série, no caso dos bipolares. As correias dentadas de transmissão são mais indicadas que as engrenagens, devido ao fenômeno da ultrapassagem provocado pelo baixo amortecimento desses motores, que poderiam quebrar ou desgastar rapidamente os dentes. Mas o melhor mesmo é, sempre que possível, utilizar a transmissão direta. Por fim, caso você queira posicionar algo com muita precisão, por meio de motores de passo, deve tentar fazer com que o número de passos, entre o ponto de referência e a posição desejada, seja proporcional (segundo um número inteiro) à quantidade de estatores do motor.

2.3.2. Tipos de Motores de Passo.

Os motores de passo são encontrados em 2 tipos: **Magnético Permanente** (*permanent magnet*) e **Relutância Variável** (*variable reluctance*), existem também os motores híbridos, que são indistinguíveis de magnético permanente ou relutância variável de ponto de vista de controle. Motores magnéticos permanente possuem a tendência a "agarrar" quando se gira o seu eixo com os dedos (com o motor desligado) e os motores de relutância variáveis giram livremente (às vezes eles podem "agarrar" levemente por causa do resíduo magnético no rotor). Motores de relutância variáveis geralmente possuem três enrolamentos (às vezes quatro), com um retorno comum, enquanto motores magnético permanentes possuem 2 enrolamentos independentes, com ou sem fio centrais (*center taps*). Enrolamentos com fios centrais são usados por motores de passo do tipo unipolar.

Motores de passo vêm em vários escalares de ângulos diferentes. Os motores menos precisos giram tipicamente 90° por passo, enquanto os motores de maior precisão são capazes de girar entre 1.8 e 0.72° por passo. Com um controle apropriado, a maioria dos motores de passos de magnéticos

permanentes e híbridos pode girar em meio-passo (*half-steps*), e alguns controles podem trabalhar com pequenas frações de passos e micro-passos.

Para ambos motores do tipo magnético permanente e relutância variável, se somente um enrolamento for energizado, o eixo irá parar num determinado ângulo e assim ficará "preso" até que o torque exceda o torque do motor, nesse ponto, o eixo irá girar, tentando manter sucessivamente a posição de equilíbrio.

2.3.2.1. Motores de Relutância Variável

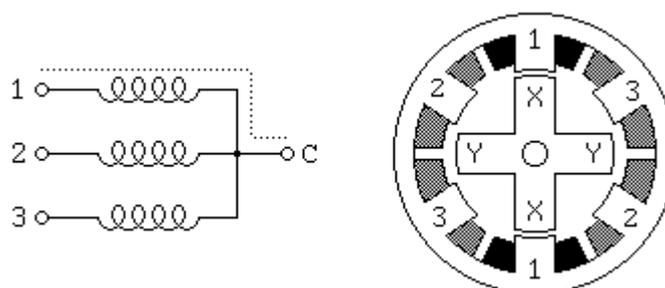


Figura 2.6. Motor de passo de relutância variável.

Possui três enrolamentos tipicamente, sendo conectados como mostra a Figura.XX, com um terminal comum para todos os enrolamentos. Este tipo é o mais comum motor de passo de relutância variável. Em uso, o terminal comum é energizado positivamente, e os demais enrolamentos são energizados em seqüência, negativo.

O motor exemplo da Figura 2.6 é de 30° por passo. O eixo desse motor possui quatro dentes e os enrolamentos ficam em volta formando seis pólos enrolados em volta de dois pólos opostos. Com o enrolamento número "1" energizado, o dente do eixo marcado com X é atraído para o pólo desse enrolamento. Se a corrente através do enrolamento "1" for cortada e o enrolamento "2" for ligado, o motor irá rodar 30° (sentido horário) até que o pólo marcado com Y se alinhe com o pólo "2".

Para girar esse motor continuamente, nós simplesmente aplicamos tensão nos três enrolamentos em seqüência. Usando lógica positiva, onde 1 significa passando corrente através do enrolamento do motor, a seqüência a seguir, Tabela 2.2, irá girar o motor ilustrado na Figura 2.6 no sentido horário, 24 passos ou 2 revoluções.

Tabela 2.2. Seqüência para giro de um motor de relutância variável.

Enrolamento	Seqüência
“1”	1001001001001001001001
“2”	0100100100100100100100100
“3”	0010010010010010010010010

Há ainda motores de passo de relutância variáveis com quatro e cinco enrolamentos, possuindo cinco ou sei fios. O princípio de controle desses motores são os mesmos dos de três enrolamentos, mas fica importante trabalhar com a ordem correta de energizamento dos enrolamentos para fazer o motor girar satisfatoriamente.

2.3.2.2. Motores de Passo Unipolares

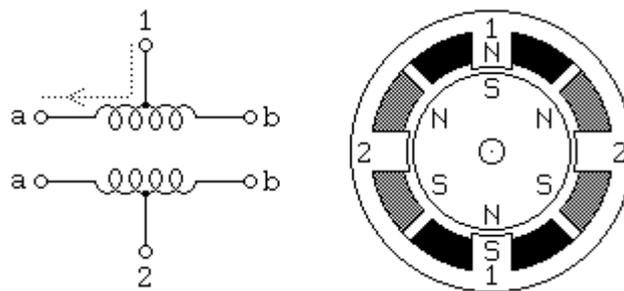


Figura 2.7. Motor de passo unipolar.

Motores de passo, tanto magnético permanente quanto híbrido com cinco ou seis fios, são geralmente exemplificados como mostra a Figura XX, com um fio central em cada um dos enrolamentos. Na prática, usualmente o fio central é ligado ao pólo positivo e os dois finais de cada enrolamento são levados ao pólo negativo alternadamente, para reverter a direção do campo magnético proveniente dos enrolamentos.

O motor mostrado na Figura 2.7 é de 30° por passo, magnético permanente ou híbrido, sendo a diferença entre esses dois tipos de motores irrelevante neste nível de complexidade. O enrolamento número “1” do motor é distribuído entre a parte de cima e a de baixo do pólo do *stator*, enquanto o enrolamento “2” é distribuído entre a esquerda e a direita dos pólos do motor. O eixo é um magnético permanente com seis pólos, três sul e três norte, colocados em volta da circunferência.

Para uma faixa angular alta, o eixo provavelmente tem que ter mais pólos. O motor de passo de 30° por passo na figura é um dos tipos mais comuns de motores de magnético permanente, entretanto motores com 15 e 7.5° por passo são facilmente encontrados. Motores de passo de magnético permanente com alta precisão como 1.8° por passo também são fabricados, motores híbridos são construídos em série de 3.6 e 1.8° por passo, com capacidade de até 0.72° por passo.

Como mostrado na Figura 2.7, a corrente circula do fio central do enrolamento “1” até o terminal “a” fazendo com que a parte superior do estator seja norte e a inferior seja sul, isso atrai o eixo na posição mostrada na figura. Se a energia do enrolamento “1” for desligada e o enrolamento “2” for energizado, o eixo irá girar 30°, ou um passo.

Para girar o motor continuamente, nós simplesmente aplicamos corrente nos dois enrolamentos em sequência. Assumindo 1 como lógico positivo, isto é energizando o enrolamento do motor, as seguintes seqüências de controle, Tabela 2.3, fará girar o motor no sentido horário, 24 passos ou 4 revoluções.

Tabela 2.3. Seqüência para rotação de um motor de passo unipolar com passo completo 1.

Enrolamento	Seqüência
“1 a”	1000100010001000100010001
“1 b”	0010001000100010001000100
“2 a”	0100010001000100010001000
“2 b”	0001000100010001000100010

Tabela 2.4. Seqüência para rotação de um motor de passo unipolar com passo completo 2.

Enrolamento	Seqüência
“1 a”	1100110011001100110011001
“1 b”	0011001100110011001100110
“2 a”	0110011001100110011001100
“2 b”	1001100110011001100110011

Note que os dois lados do mesmo enrolamento nunca são energizados ao mesmo tempo. As duas seqüências acima irão girar o motor em um passo de cada vez, chamando-as de Passo-Completo (*full-step*). A da Tabela 2.3 apenas energiza um enrolamento por vez, isso gasta menos energia. Já a seqüência da Tabela 2.4 energiza dois enrolamentos por vez e geralmente produz um

torque 1.4 vezes maior do que a sequência superior gastando o dobro de energia, com a mesma velocidade de rotação.

Se combinarmos as duas sequências de Passo-Completo, conseguiremos girar o motor em Meio-Passo (*half-step*). Isto nos proporciona maior precisão nos passos, exemplificando, um motor com 30° por passo, passa a operar a 15°, seu torque é comparado ao Passo-Completo 2, a maior consumo de energia e sua velocidade é reduzida pela metade. A sequência combinada é:

Tabela 2.5. Sequência para rotação de um motor de passo unipolar com meio passo.

Enrolamento	Seqüência
“1 a”	1100000111100000111100000111
“1 b”	000111000001111000001110000
“2 a”	011100000111100000111000001
“2 b”	000001110000011110000011100

A forma com que o motor irá operar dependerá bastante do que se deseja controlar. Há casos em que o torque é mais importante, outros a precisão ou mesmo a velocidade. Essas são características gerais dos motores de passos, a maioria deles permitem trabalhar dessa forma.

2.3.2.3. Motores de Passo Bipolares

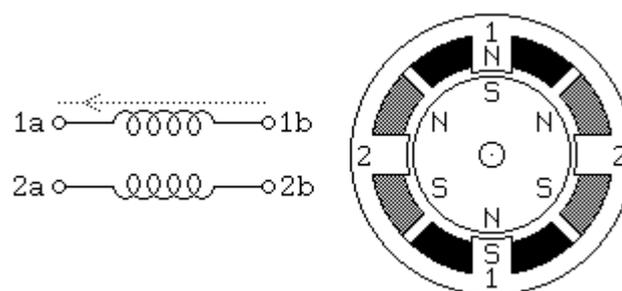


Figura 2.8. Motor de passo bipolar.

Motores de passo bipolares tanto magnético permanente, quanto híbridos são construídos com exatamente os mesmo mecanismos usados nos motores unipolares, mas os dois enrolamentos são mais simples, sem fio central. Isto significa que, o motor é mais simples, mas o circuito

eletrônico precisa controlar a reversão da corrente para cada enrolamento, isso o torna muito mais complexo. O esquema da Figura XX mostra como o motor é configurado.

O circuito eletrônico para esses tipos de motores é do tipo Ponte-H (pontes com quatro transistores). O motor precisa de uma Ponte-H para cada enrolamento. Basicamente uma ponte-H permite que a polaridade da energia aplicada a cada terminal de cada enrolamento seja controlada independentemente. A sequência de controle para um passo simples é mostrada na Tabela 2.6 e Tabela 2.7, usando os símbolos + e - para indicar a polaridade da força aplicada em cada terminal do motor.

Tabela 2.6. Sequência para rotação de um motor de passo bipolar com passo completo 1.

Terminal	Seqüência
“1 a”	+ - - - + - - - + - - - + - - -
“1 b”	- - + - - - + - - - + - - - + - - -
“2 a”	- + - - - + - - - + - - - + - - -
“2 b”	- - - + - - - + - - - + - - - + - - -

Tabela 2.7. Sequência para rotação de um motor de passo unipolar com passo completo 2.

Enrolamento	Seqüência
“1 a”	+ + - - + + - - + + - - + + - -
“1 b”	- - + + - - + + - - + + - - + + - -
“2 a”	- + + - - + + - - + + - - + + - -
“2 b”	+ - - + + - - + + - - + + - - + + - -

Note que essas sequências são idênticas as do motor unipolar, num nível representativo.

2.3.2.4. Motores Multi-Fases

Um tipo menos comum de motores de passo magnético permanente, possui seus enrolamentos ligados de uma forma cíclica, com um pequeno enrolamento ligando o centro de cada

par de enrolamentos, formando um círculo. O modelo mais comum nessa categoria usa cabeamento de três e cinco fases. Seu controle eletrônico requer meia ponte-H para cada terminal do motor.

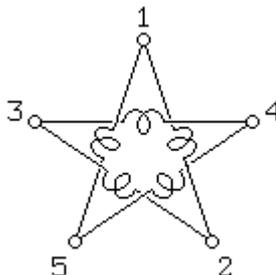


Figura 2.9. Motor de passo multi-fases.

Contudo, esses motores podem gerar mais torque do que um outro motor do mesmo tamanho, pois todos ou todos exceto um dos enrolamentos são energizados a cada passo. Alguns motores de cinco fases possuem resoluções altas, na ordem de 0.72° por passo (500 passos por revolução).

Um motor de cinco fases exige 10 passos básicos que se repetem em cada ciclo, como mostra a Tabela 2.8.

Tabela 2.8. Seqüência para rotação de um motor multi-fases com passo completo 1.

Terminal	Seqüência
“1”	+++-----+++++-----++
“2”	--+++++-----+++++---
“3”	+-----+++++-----++++
“4”	+++++-----+++++-----
“5”	----+++++-----+++++--

Aqui, como no caso dos motores bipolares, cada terminal é conectado hora no positivo hora no negativo. Repare que, a cada passo, somente um terminal muda de polaridade. Essa mudança remove a força de um enrolamento anexado no terminal (porque ambos terminais do enrolamento em questão estão na mesma polaridade) e aplica força para um enrolamento que estava previamente sem força. Um motor com a geometria da Figura 2.9, seguindo a seqüência da Tabela 2.8, irá girar o motor por duas revoluções.

3. PROJETO

Conforme descrito anteriormente, o projeto envolve muitas etapas, com diferentes graus de dificuldades de execução.

Na Figura 3.1, temos o diagrama em blocos do projeto.

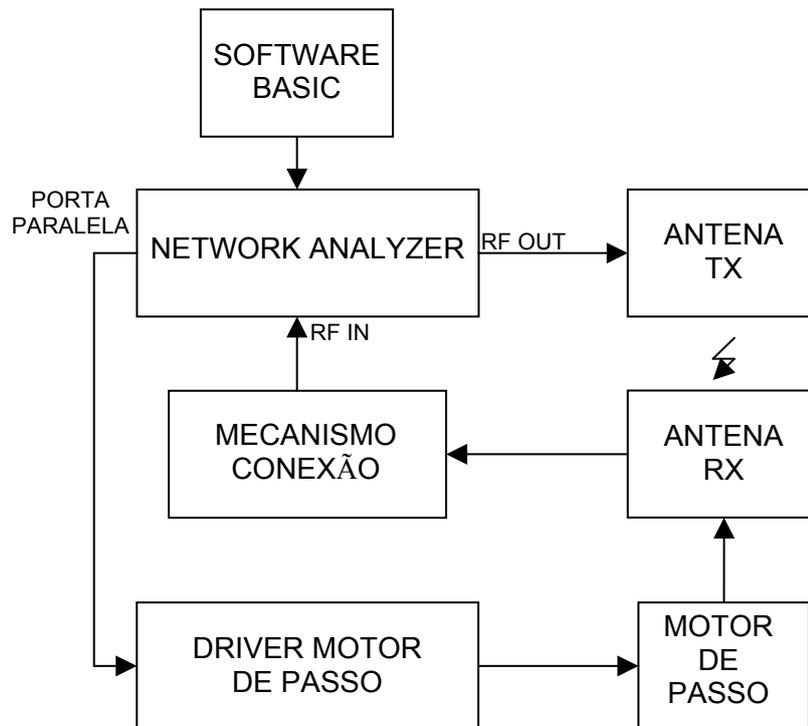


Figura 3.1. Diagrama em blocos do projeto.

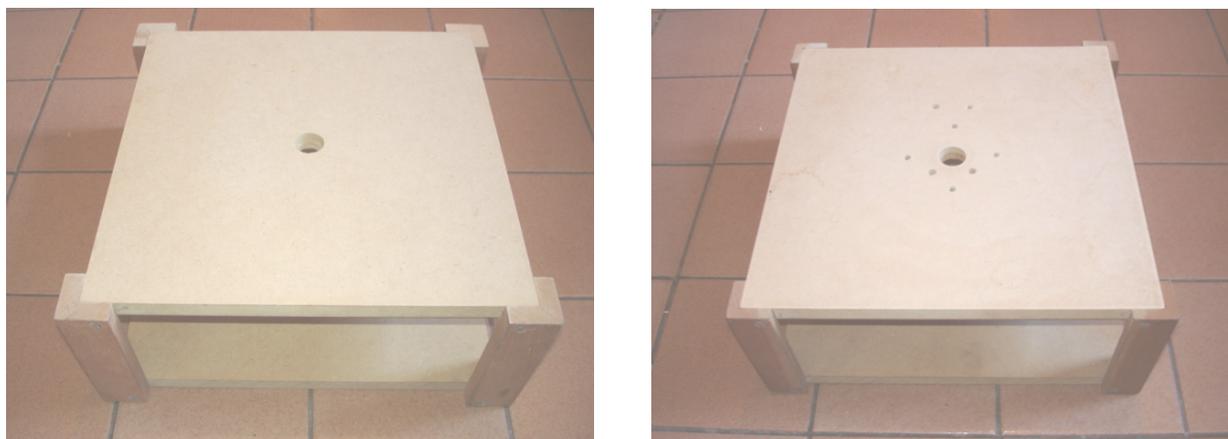
Serão descritas a seguir, as etapas do projeto.

3.1. BASES DE SUSTENTAÇÃO E HASTES DAS ANTENAS

Foram confeccionadas duas bases para o projeto em madeira do tipo MDF, Figura 3.2, sendo a base transmissora composta de uma haste de sustentação da antena fixa e a base receptora composta por uma haste móvel, movimentada pelo motor de passo. As hastes são canos de PVC de ½". Suas dimensões podem ser vistas na Tabela 3.1.

Para a haste da base receptora, foi projetado um mecanismo com rolamento, Figura 3.3. Este fixou a haste à base permitindo seu movimento (giro em seu eixo, 360°). Tal mecanismo é bem

parecido como uma “caixa de rolamento” sendo confeccionado em *Nylon*, pela Empresa Ferts Industria de Ferramentas Ltda. O rolamento utilizado é da marca SKF, modelo 6204-2ZNR.



(a)

(b)

Figura 3.2. Bases das antenas: (a) Base receptora; (b) Base transmissora.

Tabela 3.1. Dimensões das bases: transmissora e receptora.

Dimensões base receptora (mm)	Dimensões base transmissora (mm)
BxAxL: 300x130X300	BxAxL: 300x130X300
Furo central: 21,4	Furo central: 22
Haste: 750	Haste: 650



(a)



(b)

Figura 3.3. Caixa de rolamento: (a) Caixa sem rolamento; (b) Caixa com rolamento e haste.

3.2. MOTOR DE PASSO

O motor de passo, M35SP-7 utilizado, juntamente com a caixa de redução, foi reaproveitado de um antigo e inoperante *Scanner* da marca HP. Na Tabela 3.2, são dadas suas características elétricas principais.

Tabela 3.2. Principais características elétricas do motor de passo M35SP-7.

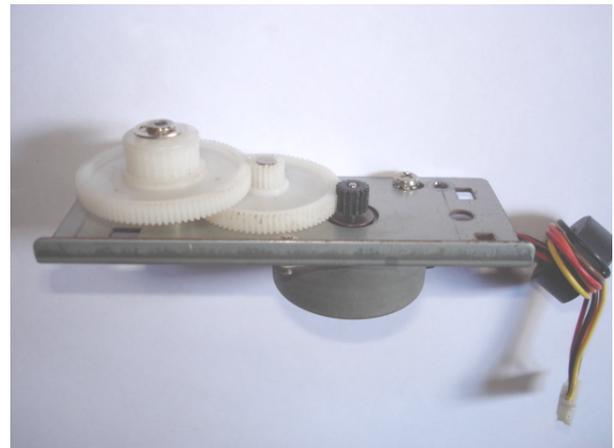
Item	M35SP-7
Tensão de operação	24 VDC
Range de tensão	21,6 – 26,4 VDC
Corrente máxima por fase	517 mA.
Resistência por enrolamento	50 Ω
Ângulo por passo	7,5°
Tipo	Unipolar de cinco fios

Fonte: Adaptado de www.mitsumi.co.jp/Catalog/compo/motor/m35sp/7/text01e.pdf

Na Figura 3.4. temos a foto do motor e sua caixa de redução.



(a)



(b)

3Figura 3.4. Fotos do motor: (a) Motor de passo; (b) Motor de passo e caixa de redução, integrados.

Em medidas práticas, o fator de redução do conjunto, motor – caixa de redução é de: 25 vezes. Ou seja, a cada passo de 7,5° do motor, teremos ao final da caixa de redução, um passo de

0,3°, essa informação é muito importante para o desenvolvimento do *software* de controle, conforme será descrito mais à frente.

3.3. DRIVER DO MOTOR DE PASSO

Antes de projetar o *driver*, deve-se levar em conta qual o tipo de motor esta sendo utilizado, conforme mencionado anteriormente, neste caso o unipolar.

Com base nas informações adquiridas do motor de passo, foi adotado que seu terminal comum, seria conectado ao positivo e o terminal correspondente a cada bobina será conectado ao negativo, seqüencialmente, gerando os passos. Para isso, foi utilizado o circuito integrado ULN2004, este possui sete *drivers* inversores, ou seja, a cada informação com nível lógico “1”, aplicada a entrada do circuito integrado, sua saída correspondente irá ser “0”. Cada saída estará ligada a um terminal da bobina do motor, num total de quatro terminais. Conforme Figura 3.5.

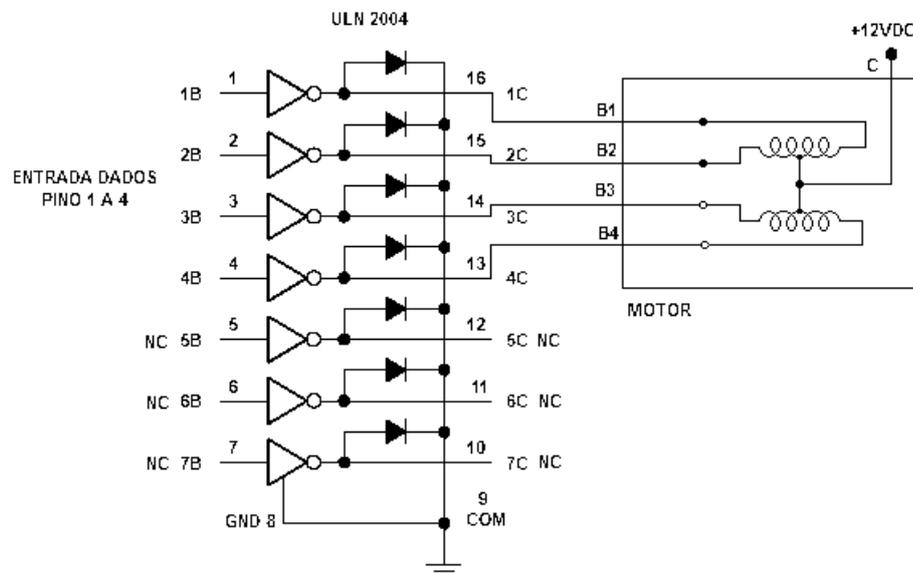


Figura 3.5. Diagrama de Conexão entre ULN2004 e o Motor de Passo.

O circuito integrado ULN2004 é muito empregado nestas aplicações e onde a corrente não exceda 500 mA e a tensão 50 V. Como o motor empregado no projeto tem uma resistência de 50 Ω por enrolamento a corrente não excederá 240 mA, sendo alimentado por 12 V.

Como as informações para o *driver* virão da porta paralela do *Network Analyzer*, é indispensável que o circuito ofereça proteção à porta, evitando que possíveis transientes ou até

queima de algum componente possa danificá-la. Pensando nisso, foram adotados a cada entrada de dados, acopladores ópticos, minimizando assim estes riscos.

Outra característica deste *driver* é o seu display, que indica a bobina energizada. Isto permite uma fácil detecção de possíveis falhas e auxílio no desenvolvimento do *software* de controle. Sua ligação foi feita, tomando como base o mesmo circuito integrado utilizado para o motor, sendo suas conexões muito semelhantes. Na Figura 3.6, podemos ver o esquema elétrico completo do *driver*.

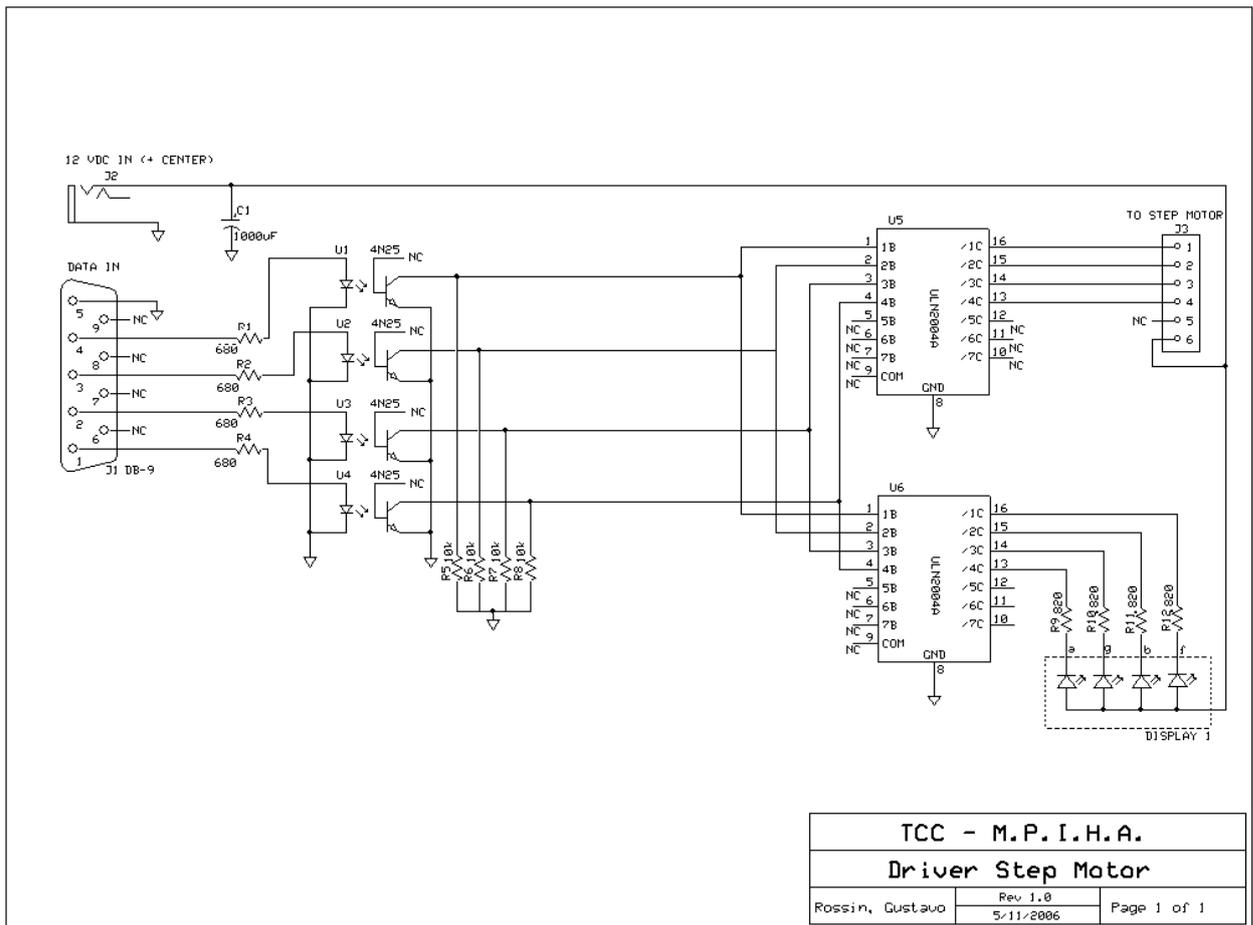


Figura 3.6. Esquema elétrico completo do motor de passo.

O conector de entrada de dados utilizado no circuito é o DB-9, sendo eficaz, já que são necessários de apenas 4-bit de dados, além da referência GND. Porém, as informações serão fornecidas pelo *Network Analyzer* através de um conector DB-25. Na confecção do cabo de conexão, foram respeitadas as devidas alterações, sendo para isso feito um estudo do padrão de pinos da porta paralela, Figura 3.7. Os pinos de dados vão de D0 a D7, totalizando 8-bit. Iremos utilizar neste projeto as informações dos bits D0 a D3, ou seja, os pinos 2, 3, 4 e 5 da porta, além de um terra, que pode ser qualquer pino, entre 18 e 25.

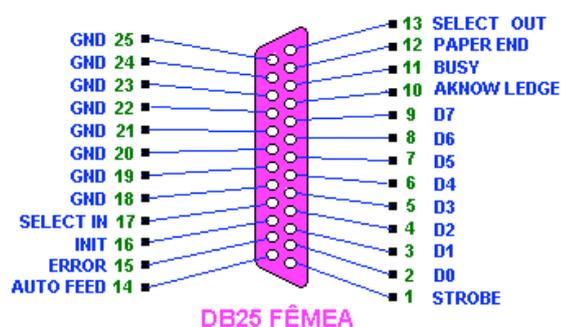


Figura 3.7. Diagrama da porta Paralela

No *driver*, os pinos correspondentes do DB-9, para as informações são os: 1, 2, 3 e 4, o terra é o 5. Na Tabela 3.3, temos o diagrama do cabo.

Tabela 3.3. Diagrama do Cabo de Dados DB-25 / DB-9

Conector DB-25 Macho –Pinos	Conector DB-9 Fêmea - Pinos	Informação
2	1	D0
3	2	D1
4	3	D2
5	4	D3
25	5	GND

As características do driver são dadas a seguir:

- Alimentação: 12Vdc;
- Isoladores ópticos, oferecendo proteção à fonte de informações do driver;
- Led indicador de funcionamento;
- Display indicativo da bobina do motor energizada;
- Capacidade de acionamento de motores, com consumo de até 500 mA por bobina em 12 V;
- Todas as conexões (motor, fonte de alimentação e dados) são feitas através de conectores, oferecendo praticidade à montagem.

A fonte de alimentação utilizada tem as seguintes características:

- Entrada: 100 – 240 Vac, 0,4A;
- Saída: 12Vdc, 1.25A

O circuito montado em placa de circuito impresso, fenolite, pode ser visto na Figura 3.8.

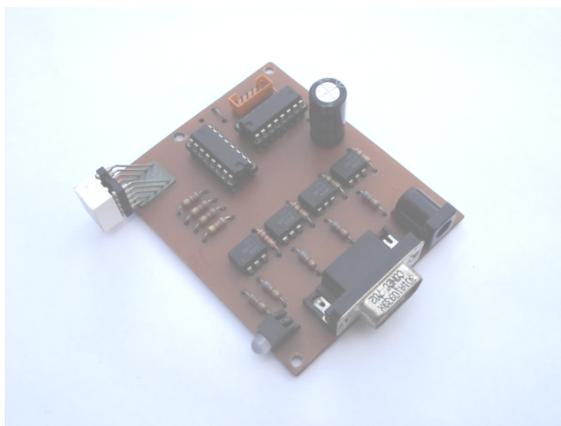


Figura 3.8. Foto do *driver* do motor de passo confeccionado em PCI.

3.4. MECANISMO DE CONEXÃO DE RF COM ROTAÇÃO DE 360°

Seu objetivo é permitir que o sinal recebido pela antena da base receptora possa ser medido, sem que haja qualquer cabo a ela diretamente conectado, que possa enrolar-se na haste de sustentação, já que esta terá movimento em seu próprio eixo. Pensando em projetar um dispositivo com custo reduzido, chegou-se a idéia de usar conectores do tipo SMB. Este tipo de conector não possui rosca para fixação em seu equivalente, macho ou fêmea. A conexão é feita através de pressão, sendo assim, permite que o conector possa girar em seu eixo quando conectado. Na figura 3-9, tem-se a foto dos conectores SMB utilizados no projeto.



(a)



(b)

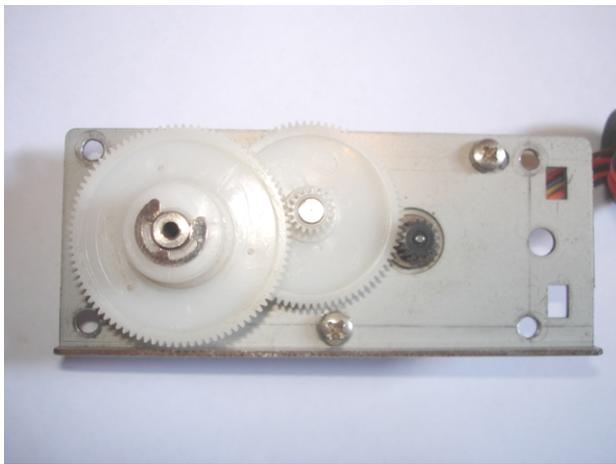
Figura 3.9. Conectores SMB: (a) Adaptador SMA F / SMB M e SMB F vertical; (b) Conexão de ambos.

Dada esta característica do conector SMB, a idéia foi conectar a antena a um cabo coaxial semi-rígido e este passar por dentro da haste de sustentação da antena, já que esta nada mais é que

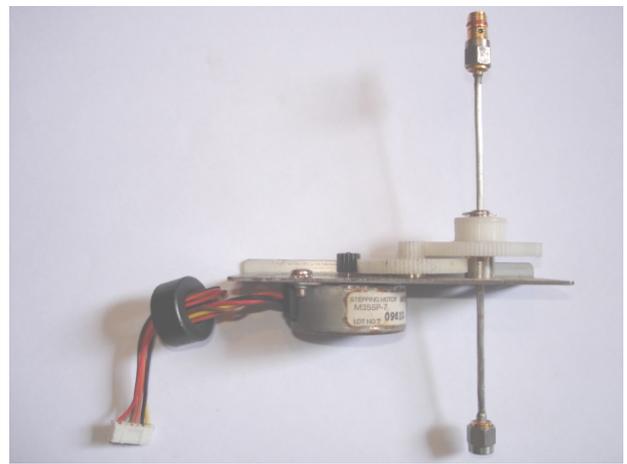
um cano de PVC. O cabo passará através de um furo pelo eixo da engrenagem da caixa de redução, que estará conectada a haste.

O cabo coaxial semi-rígido conectado a antena, é do tipo SR-141 (3,5 mm de espessura). Porém a dimensão do eixo pelo qual este cabo teria que passar oferece apenas 7 mm de largura e não permitiria que um furo superior a 3,5 mm fosse feito, sem que oferecesse risco de danificá-lo. A solução para este problema foi utilizar um pequeno pedaço de cabo semi-rígido do tipo SR-086 (2,15 mm), conectados através de conectores do tipo SMA ao cabo de SR-141. Assim, foi feito um furo de 2,5 mm no eixo e este cabo foi utilizado com sucesso. Nas Figura 3-10 e 3-11 temos as fotos da passagem deste cabo pelo furo e sua conexão ao cabo de 3,5 mm.

Não foi utilizado em todo o comprimento da haste o cabo semi-rígido SR-086, pois este é muito mais maleável que o SR-141 e não ofereceria a sustentação necessária à antena, ou a grosso modo, entortaria-se com o peso da antena.

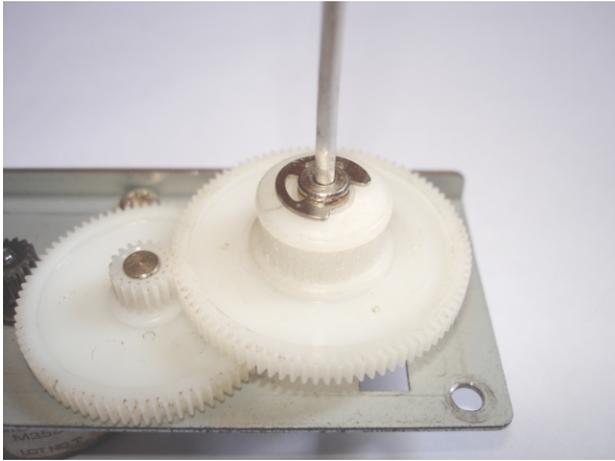


(a)

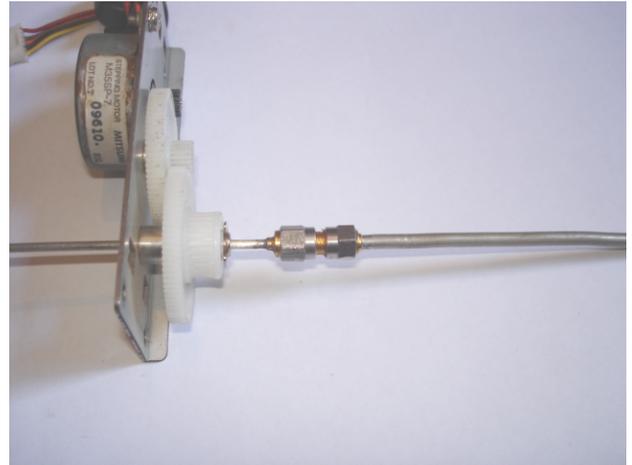


(b)

Figura 3.10. Caixa de redução e motor: (a) Furo de 2,5 mm no eixo da engrenagem da haste; (b) Cabo SR-086 com conectores SMA, após passagem pelo eixo.



(a)



(b)

Figura 3.11. Passagem do cabo SR-086 pelo eixo da engrenagem: (a) Detalhe da passagem do cabo pelo eixo; (b) Conexão do cabo SR-141 e SR-086.



(a)



(b)

Figura 3.12. Conexão da haste à caixa de redução: (a) Adaptação da haste à engrenagem; (b) Detalhe adaptador: SMB Macho / SMA Fêmea.

O passo seguinte é desenvolver a placa de circuito impresso, a qual possuirá o conector SMB fêmea, onde o cabo semi-rígido proveniente da antena será conectado. Esta será devidamente posicionada e fixada bem abaixo do eixo da engrenagem da haste através de espaçadores.

A placa possui uma linha *microstrip*, ligando o conector SMB macho (que estará conectado a antena) a um conector SMA fêmea de 90°. A este conector será conectado o cabo coaxial, do tipo M42, que levará o sinal ao *Network Analyzer*, porta *RF INPUT*.

Para o cálculo desta linha de transmissão, foi utilizado o *software TxLine* [8], o qual utiliza para os seus cálculos a mesma teoria apresentada anteriormente, Equação 2-33 e 2-34. Mas para isso são necessárias algumas informações referentes ao tipo de substrato utilizado. Na Tabela 3-4 têm-se as características do substrato utilizado neste projeto.

Tabela 23.4. Características do substrato FR-4 TG150 dupla face com fita condutora de cobre.

Espessura substrato (mm)	Espessura fita condutora (mm)	Constante Dielétrica @ 1 GHz	Tangente perda do substrato @ 1 GHz
1.2	0,035	4,5	0,0148

Fonte: Adaptado de Pertech do Brasil [3].

Na figura 3-13, temos a tela do *software TxLine*, com o resultado da largura de fita necessária (chamaremos de $W1$) para obter uma impedância característica de 50Ω a 1,2 GHz.

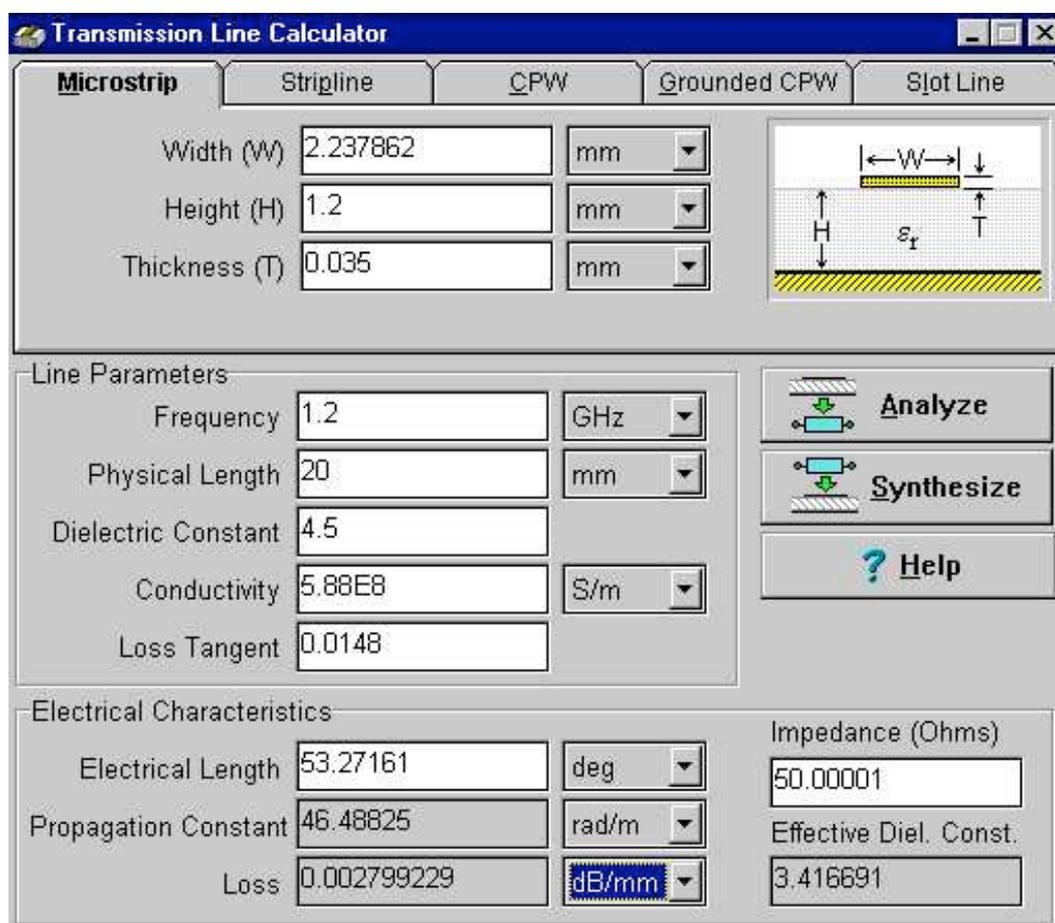


Figura 3.13. Resultado do cálculo da linha *microstrip*

Com a largura da linha *microstrip* calculada, foi confeccionada a placa de circuito impresso. Seu *layout* pode ser visto na Figura 3-14.

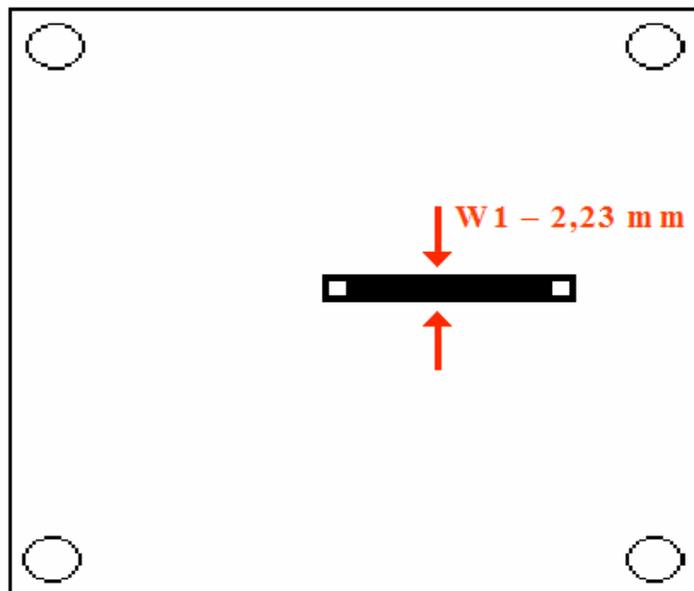
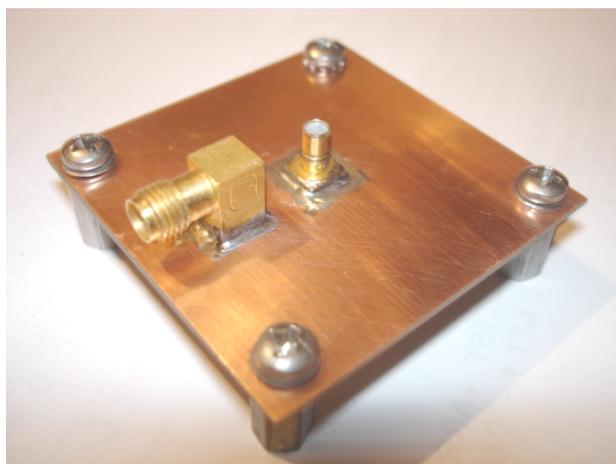
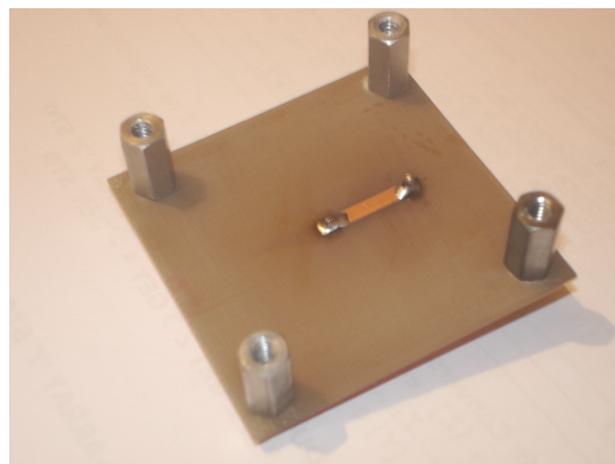


Figura 3.14. *Layout* da placa do mecanismo de conexão 360°.

Na Figura 3-15, podemos ver a placa confeccionada, com os conectores e espaçadores.



(a)



(b)

Figura 3.15. PCI mecanismo de conexão 360°: (a) Vista superior – plano terra; (b) Vista inferior – linha microfitas.

Feitas todas as adaptações, o passo seguinte é fazer a montagem do mecanismo. As Figuras 3.16 e 3.17, mostram os passos da montagem.

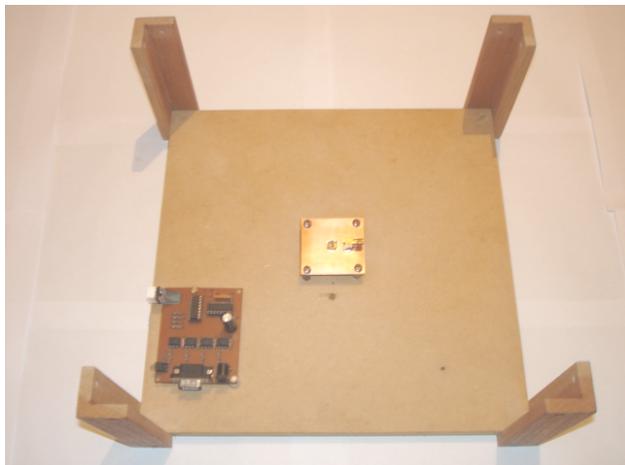


(a)

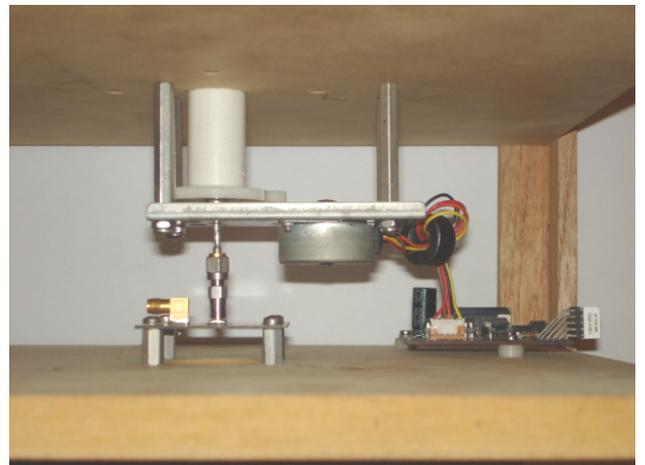


(b)

Figura 3.16. Montagem da base receptora: (a) Fixação da caixa de redução e motor à base; (b) Fixação da caixa de rolamento e haste à base.



(a)



(b)

Figura 23.17. Finalização montagem: (a) Posicionamento das placas; (b) Montagem finalizada.

3.5. ANTENAS MICROFITA RETANGULARES

O desenvolvimento das antenas, assim como no capítulo 3.4, contou com o auxílio de um *software*, *Antenas* [7], que também utiliza para seus cálculos a mesma teoria descrita anteriormente.

O substrato utilizado, também é o FR-4 TG150, conforme Tabela 3.5.

Na Figura 3-18, temos a tela do software, com o resultados das dimensões da antena. Para identificação das dimensões, veja Figura 2.3.

Neste projeto, a estrutura mecânica, foi projetada levando em conta a alimentação das antenas por meio de uma linha *microstrip*, assim, essa opção desse ser levada em consideração na hora do seu cálculo. A largura desta linha de alimentação é a mesma calculada no mecanismo de conexão de RF de 360°, já que a frequência e impedâncias são as mesmas.

Na Figura 3.19, temos o *layout* final com a linha de alimentação *microstrip*.

The screenshot shows the 'Antena de Microfita Retangular' software window. It is divided into two main sections: 'Entrada de dados:' (Input data) and 'Resultados:' (Results).

Entrada de dados:

- Frequência (GHz): 1.2
- Constante dielétrica relativa (Er): 4.5
- Altura do substrato (cm): 0.12
- Tangente de perda do substrato: 0.0148
- Impedância de ressonância (ohms): 50
- Condutividade da placa condutora (S/m): 57600000
- Comprimento elétrico βl (graus): 60
- VSWR: 1
- Tipo de alimentador:
 - Cabo coaxial de 50 ohms.
 - LTM - Linha de Transmissão de Microfita.

Resultados:

- Impedância de entrada (ohms): 326.870
- Impedância característica (ohms): 2.697
- Constante dielétrica relativa efetiva: 4.354
- Comprimento da antena de microfita retangular (cm): 5.879
- Largura da antena de microfita retangular (cm): 7.538
- Diretividade (dB): 5.979
- Fator de qualidade total (Qt): 37.549
- Largura de banda (%): 0.000
- Eficiência de irradiação da antena de microfita: 79.137
- Ponto de alimentação para ressonância com a LTM (cm): 2.188
- Distância da borda até o condutor central do cabo (cm): 0.000

Figura 3.18. Software *Antenas*, dimensões.

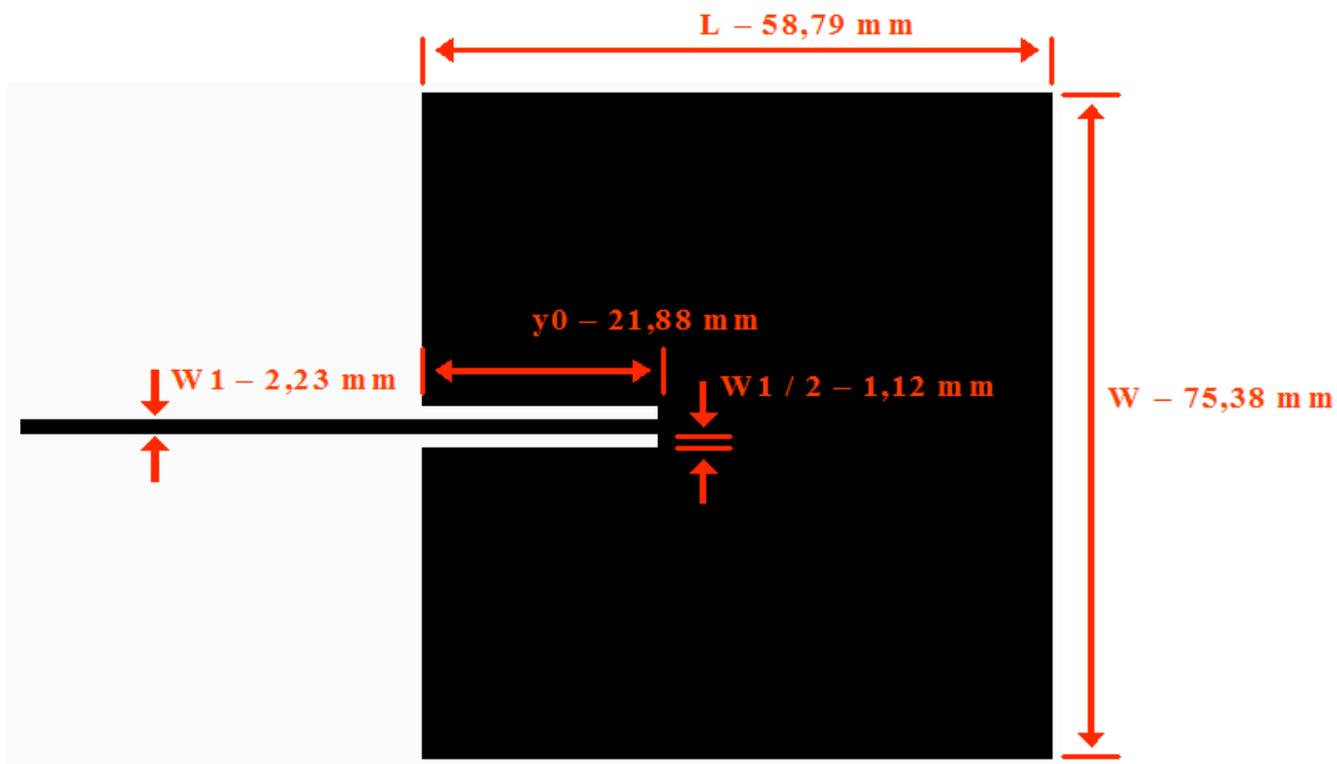


Figura 3.19. *Layout* da Antena Microfita.

As antenas confeccionadas podem ser vistas na Figura 3-20. Os conectores são do tipo SMA fêmea.

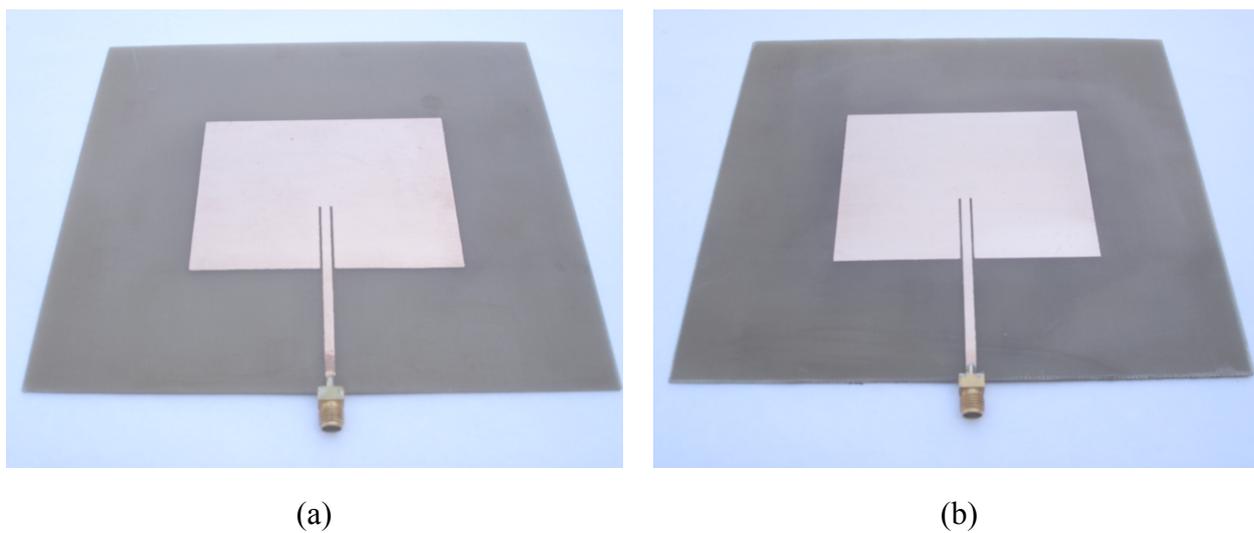


Figura 23.20. Antenas Microfita: (a) Antena TX; (b) Antena RX.

3.6. SOFTWARE DE CONTROLE DO NETWORK ANALYZER HP8712

Uma das principais características deste projeto é a automatização das medidas dos sinais recebidos pela antena. O *Network Analyzer* HP8712 utilizado, é passível de programação em linguagem *Basic*, [4], [5], [6], sendo utilizado como a base de controle de todo projeto.

A idéia do *software* é bem simples, ele deve controlar o instrumento, de modo que este gere o sinal a ser transmitido e meça-o a cada incremento ou vários incrementos de passo no motor, incrementos esses que devem ser controlados pelo próprio instrumento. Os valores das medidas realizadas devem estar disponíveis da tela do instrumento, para posterior impressão e análise.

Inicialmente pensou-se em realizar a medida do sinal recebido a cada incremento do motor de passo, porém conforme citado anteriormente, o conjunto motor / caixa de redução, acresce ao movimento final (haste da antena) $0,3^\circ$ por passo, o que representa 1200 passos para os 360° necessários. Isso sem duvida demonstraria um plano de radiação muito preciso. No entanto, durante o desenvolvimento do *software*, observou-se que o instrumento não comporta tantas informações em uma mesma tela e isto se faz necessário, pois as medidas serão recolhidas do equipamento em forma de uma impressão da tela. A solução adotada foi realizar a medida do sinal recebido a cada 6° , o que equivale 20 passos do motor, assim, o total de informações passa das 1200 para 60, permitindo que todos os dados apareçam na tela, no formato de 4 colunas de 15 linhas cada.

Para incrementar os passos no motor, as informações enviadas a porta paralela devem seguir uma seqüência, conforme descrito na teoria sobre motores de passo, Capítulo 2.3. Cada enrolamento deve ser energizado um após o outro.

As informações enviadas a porta paralela (palavras), nada mais são que números reais, conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Informações enviadas a porta paralela.

Número do passo	Palavra decimal	Informação enviada ao <i>driver</i>			
		D3	D2	D1	D0
1	1	0	0	0	1
2	2	0	0	1	0
3	4	0	1	0	0
4	8	1	0	0	0

Cada seqüência da tabela anterior representa um incremento de 4 passos, essa seqüência é repetida 5 vezes pelo software, antes de cada medida do sinal recebido, assim a medida de potencia é realizada a cada 20 passos ou 6°. Feito isso, esse ciclo é repetido mais 60 vezes, o que totaliza os 1200 passos necessários para termos os 360°.

Na Figura 3.21, temos o *software* completo com seus devidos comentários. O *software* é carregado no instrumento, via seu *driver* de disquete 3,5" (*floppy disc*), de tal maneira: SAVE RECALL / SELECT DISC / INTENAL 3,5" / PRIOR MENU / PROGRAMS / ANTENA.BAS / RECALL PROGRAM / RUN.

```

100!*****
101! INICIALIZA RF NETWORK ANALYZER
102! Seta frequencia de saida para 1200MHz
103! Seta potencia de saida em 0dBm
104!*****
105 DIM A$(58), String$(1000)
110 REAL Grau, Posicao, Potencia, Tela
120 CLEAR SCREEN
130 ASSIGN @Hp8712 TO 800
131 OUTPUT @Hp8712;"DISP:PROG FULL;*WAI"
132 OUTPUT @Hp8712;"DISP:GRAPH:CLEAR;*WAI"
134 PRINT TABXY(3,1);"TCC-MEDIDOR DE PLANO DE IRRADIACAO DE ANTENAS-DEZ/2006"
135! PRINT TABXY(18,2);"GUSTAVO ROSSIN DEZEMBRO 2006"
140 OUTPUT @Hp8712;"SYS:PRES;*WAI"
150 OUTPUT @Hp8712;"SENS1:FREQ:STAR 1200 MHZ;STOP 1200 MHZ;*WAI"
151 PRINT TABXY(5,3);"Nivel RF OUT: 0 dBm"
152 PRINT TABXY(5,4);"Nivel RF IN:          dBm"
160 OUTPUT @Hp8712;"SOUR1:POW 0 DBM;*WAI"
161 PRINT TABXY(35,3);"Frequencia: 1200MHz"
170 OUTPUT @Hp8712;"OUTP:STAT ON;*WAI"

200!*****
201! ROTINA PRINCIPAL
202! Incrementa 20 passos no motor e grava variavel para leitura de potencia.
203! Cada passo equivale a 0,3 graus -> 20 passos = 6 graus
204!*****

205 Grau=-6

```

```

206 Tela=0
220 FOR N = 1 TO 60
221   Grau=Grau+6
222   Tela=Tela+1
225     FOR W = 0 TO 4
230       FOR I = 0 TO 3
265         CALL Incrementa (I)
275       NEXT I
280     NEXT W
290   CALL LePotencia(Grau,Tela)
295 NEXT N
296 END

300!*****
301! INCREMENTA POSICAO DO MOTOR DE PASSO
302! Posicao: numero real que determina o incremento de 1 (uma) posicao
303! Palavra: byte a ser escrito na porta paralela
304! Endereço porta paralela: 15,3. Escreve na porta: 1, 2, 4 e 8 (real)
sequencialmente
305!*****
310 SUB Incrementa(Posicao)
320   Palavra = (2 ^ Posicao)
330   WRITEIO 15,3;Palavra
340   WAIT .1
350 SUBEND

400!*****
401! LE POTENCIA
402! Potencia: valor da potencia em dBm
403! Faz leitura da potencia e grava como variavel (Potencia)
404!*****
410 SUB LePotencia(Grau,Tela)
415   ASSIGN @Hp8712 TO 800
420   OUTPUT @Hp8712;"CALC1:MARK1 ON;*WAI"
430   OUTPUT @Hp8712;"CALC1:MARK1:MAX;*WAI"
440   OUTPUT @Hp8712;"CALC1:MARK1:Y?;*WAI"
450   ENTER @Hp8712;Potencia
451   PRINT TABXY(17,4);Potencia

```

```

460     CALL Armazena(Potencia,Grau,Tela)
499 SUBEND

500!*****
501! GERA GRAFICO E GRAVA DADOS EM ARQUIVO
502! Grau: Posicao relativa
503! Potencia: valor da potencia em dBm
504! Chama variavel "Potencia" a cada 6 graus e mostra na tela
505!*****
510 SUB Armazena(Potencia,Grau,Tela)
520     GINIT
530     GCLEAR
531     MOVE 0,89
541     IF Tela>45 THEN
542         PRINT TABXY(45,Tela-40);Grau
543         PRINT TABXY(50,Tela-40);Potencia
544     ELSE
545         IF Tela>30 THEN
546             PRINT TABXY(30,Tela-25);Grau
547             PRINT TABXY(35,Tela-25);Potencia
548         ELSE
549             IF Tela>15 THEN
550                 PRINT TABXY(15,Tela-10);Grau
551                 PRINT TABXY(20,Tela-10);Potencia
552             ELSE
553                 PRINT TABXY(1,Tela+5);Grau
554                 PRINT TABXY(5,Tela+5);Potencia
555             END IF
556         END IF
557     END IF
599 SUBEND

```

Figura 23.21. *Software* de controle do *Network Analyzer*.

Após todas as medidas realizadas, devemos gerar um arquivo de imagem, do tipo GIF. De tal maneira: HARD COPY / SELECT COM PORT / FILE GIF INTENAL 3,5" / PRIOR MENU / START. Deste modo o arquivo é gerado no disquete onde o *software* de controle se encontra.

3.7. TESTES FINAIS COM AS ANTENAS MICROSTRIP.

Inicialmente é preciso posicionar devidamente as bases de transmissão e recepção, de forma que ambas as antenas fiquem com suas faces irradiantes frente a frente. Na Figura 3.22, temos a foto do *setup* completo, com o posicionamento das bases e conexão de todos os cabos.



Figura 3.22. *Setup* completo de testes.

Feito isso, o *software* de controle é executado. Na Figura 3.24, temos o foto da tela do instrumento com o teste em execução.

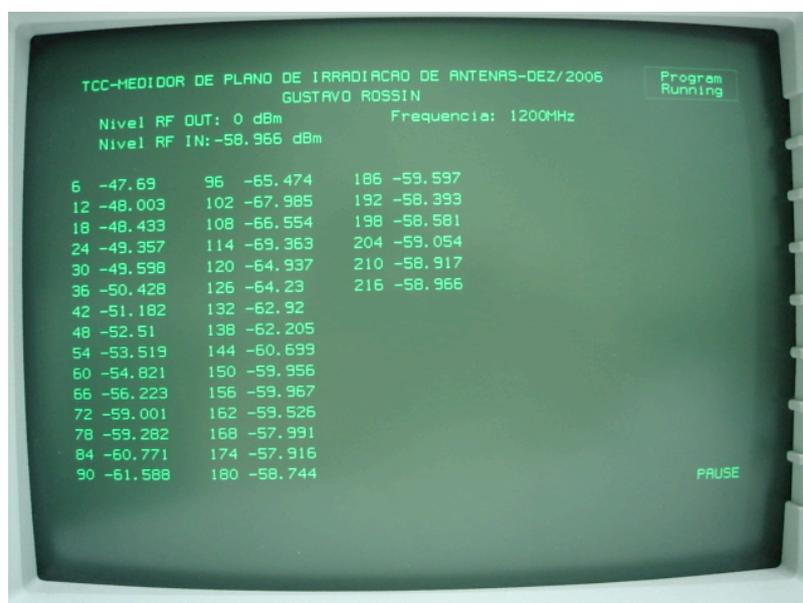


Figura 3.23. Teste em execução.

Na Figura 3.25, temos o arquivo no formato GIF gerado pelo instrumento.

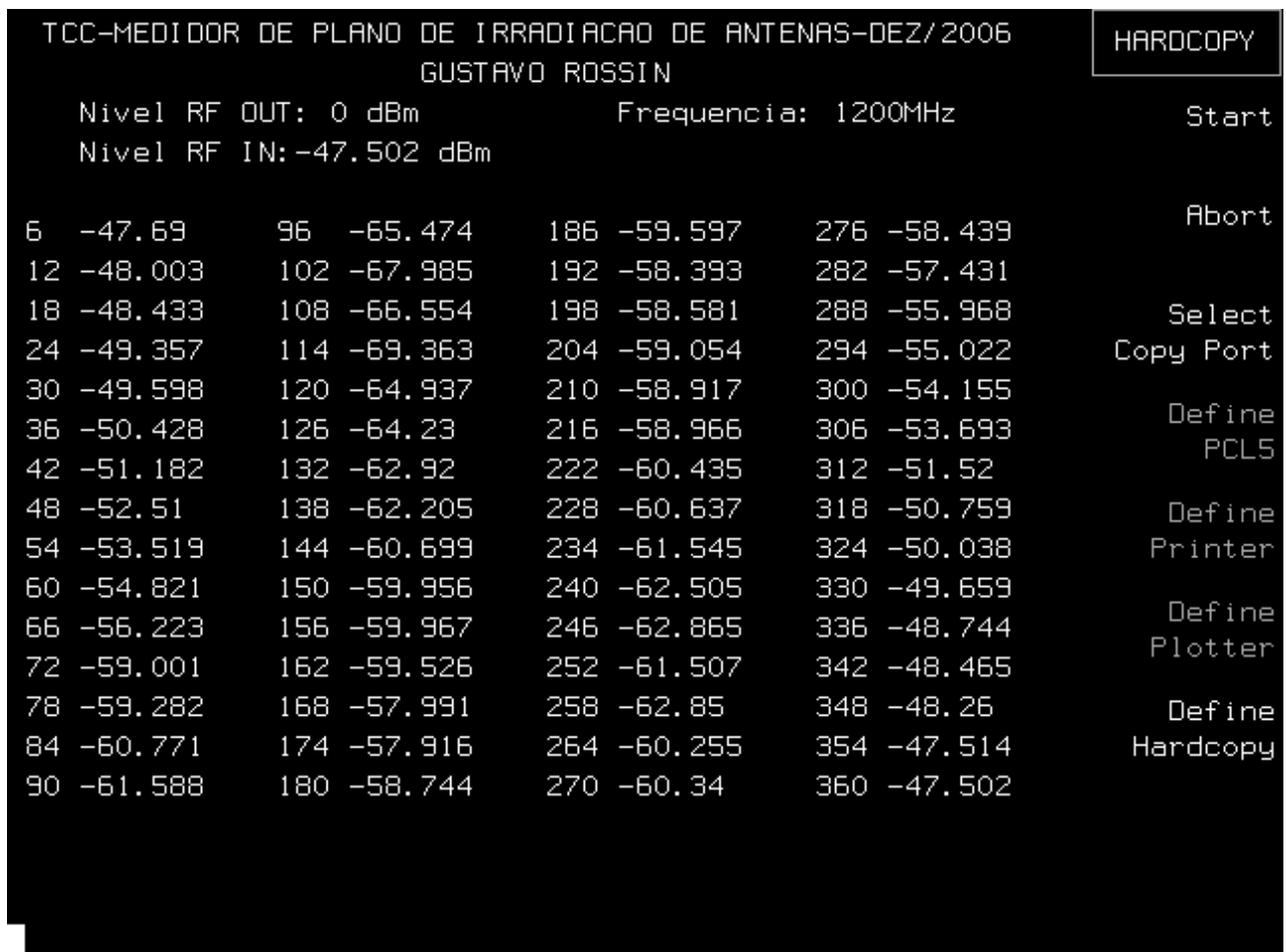


Figura 3.24. Arquivo gerado pelo instrumento após conclusão do teste.

Com base nas informações coletadas, é gerado gráfico do plano de radiação. Para isso, foi utilizado um gráfico do tipo radar, do *Microsoft Excel*, devidamente configurado para tal operação. Na Figura 3.26, temos o gráfico gerado.

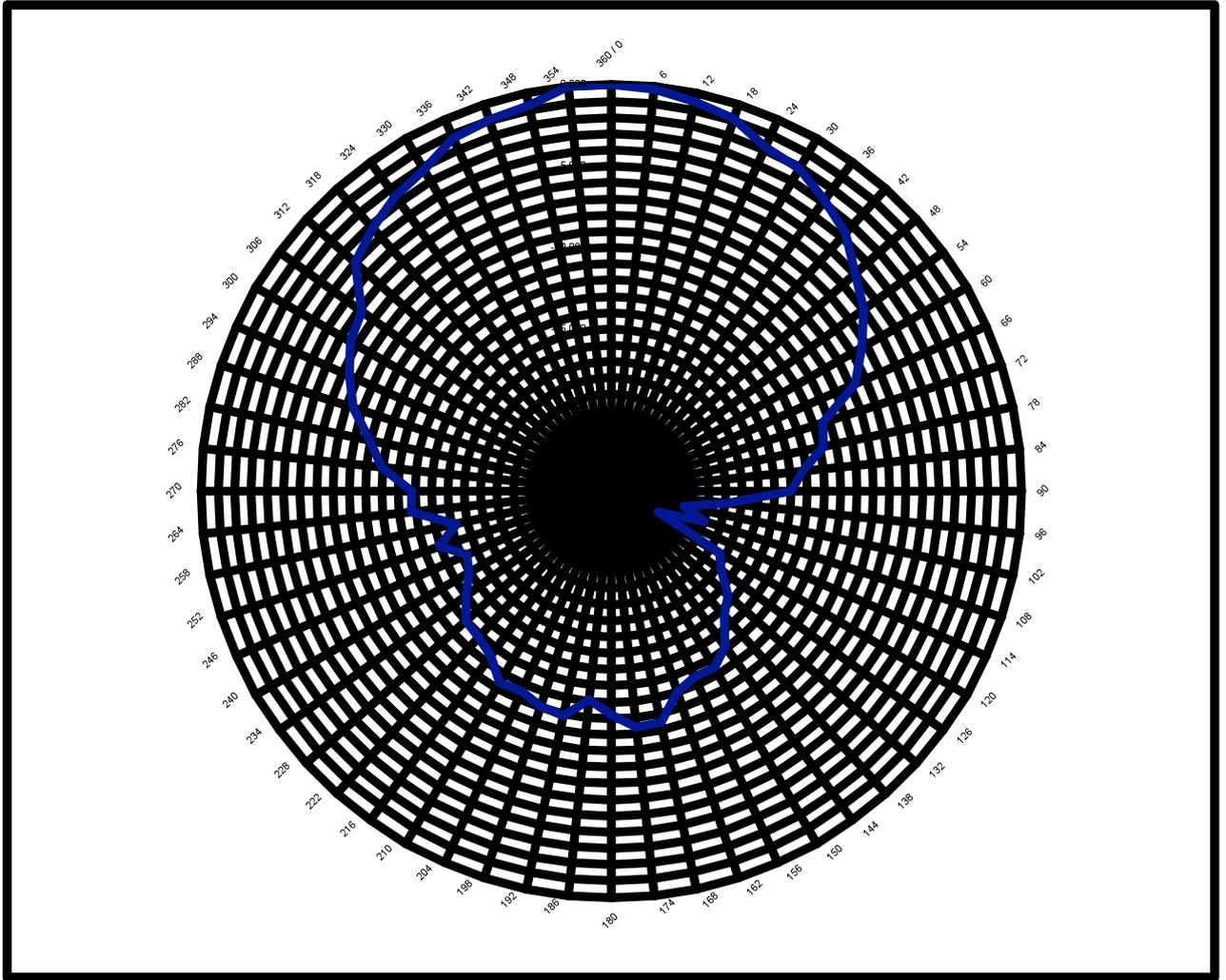


Figura 3.25. Plano de radiação da antena.

4. CONCLUSÃO

4.1. TRABALHO DESENVOLVIDO

Este projeto apresentou um grau de dificuldade bastante elevado. Foram abordadas diversas áreas, como Mecânica, Eletrônica, Programação e Rádio Frequência. Em todas, foram confeccionados mecanismos ou dispositivos.

Durante meses foram estudados e desenvolvidos meios de viabilizar a idéia inicial. O resultado final demonstra a viabilidade do projeto, que se mostrou eficiente quanto ao seu objetivo.

4.2. TRABALHO FUTURO

Como trabalho futuro, sugere-se o aprimoramento da estrutura mecânica, a fim de suportar antenas de peso e tamanho maiores, além do desenvolvimento de um Kit de Antenas para ensaio.

Também não utilizar o *Network Analyzer* como o gerenciador do software, pois desta maneira, todo o projeto esta obrigatoriamente atrelado a ele. E sim, que todo o controle do mecanismo seja feito através de um micro-computador, com o devido software desenvolvido (*Visual Basic, Lab View, etc*). Os sinais de RF podem ser facilmente gerados e medidos por um Gerador de RF e um Analisador de Espectro, equipamentos mais fáceis de serem encontrados em Universidades e Escolas Técnicas. A maioria dos Analisadores de Espectro contam com portas de dados do tipo RS-232, Paralela e GP-IB (ou HP-IB), que podem enviar os dados dos os sinais medidos ao micro-computador.

Em último grau de dificuldade, sugere-se o desenvolvimento de um gerador de RF sintetizado para a antena de TX e para realizar a medida do sinal, um circuito dotado de um detector de RF a cristal ou diodo *Schottky*, com tabela de correção de medida, pois estes têm resposta não linear. O controle do *PLL* do gerador pode ser muito bem realizado pelo software de controle do projeto, existem circuitos integrados hoje no mercado de baixo custo que contam com esse recurso, como o *PLL LMX-2332* na *National Semiconductor* [9], que opera em conjunto com *VCO's* de mais de 2 GHz, como os da *Mini Circuits* [10].

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Teses

[1] COSTA, Sidney Carlos C. da, et al. **Ambiente Computacional – ANTENAS**. Universidade Federal do Pará - UFPA. Belém, PA. 1998.

Manuais

[4] *HP8712/14/ET/ES Ibasic Supplement*

[5] *HP8712/14/ET/ES Example Programs Guide*

[6] *HP8712/14/ET/ES Automating Measurements*

Internet

[3] Pertech do Brasil.

(http://www.pertech.com.br/site_outros_segmentos/produtos_laminados_industriais_solicite_catalogo.htm)

[2] COSTA, Alexandre - “Robótica”.

(http://www.mrshp.hpg.ig.com.br/rob/m_passo.htm)

[9] *MiniCircuits*.

(http://www.minicircuits.com/products/vcos_main.html)

[10] *National Semiconductor*.

(<http://www.national.com/search/search.cgi/main?keywords=lmx-2332>)

Softwares

[7] Antenas.

(http://www.ufpa.br/dee/lea/Soft/Programa_Antenas.zip)

[8] *TxLine*.

(<http://www.taconic-add.com/downloads/txline.zip>)

ANEXO 1. SR-086



.086 diameter is the most common size Semi-Rigid cable. This size matches well with miniature high frequency connectors such as 2.4mm and SMP. The use of an aluminum jacket will allow final shaping at the installation site. Florida RF Labs® cable assemblies are Space Qualified and available unbent or shaped to your specifications.

Cable Types

.086 DIA.	Cable Code	Jacket Material	Finish
M17/133-RG405	RG405	Copper	None
M17/133-00001	405TP	Copper	Tin
M17/133-00013	AL085	Aluminum	Tin
Low-Loss	LL085	Copper	None

SMSR Connectors

RG405 cable can be pre-bent to 90 degrees before soldering a low profile SMA plug forming a right angle with a height profile less than a standard right angle connector. This pre-bent right angle is lower in cost and has no electrical performance degradation as with standard right angles.

(See Pre-Bent right angle dimensions for RG405 on page 48)

Part Numbering Code for Semi-Rigid 086

MMS	-	RG405	-	12.0	-	MMS	
Connector #1		Cable Code		Length (in.)		Connector #2	
MMS = 2.4 mm Male Straight		RG405 = M17/133-RG405		Example:		MMS = 2.4 mm Male Straight	
MFS = 2.4 mm Female Straight		405TP = M17/133-00001		12.0 = 12 inches		MFS = 2.4 mm Female Straight	
SMS = SMA Male Straight		AL085 = M17/133-00013				SMS = SMA Male Straight	
SMR = SMA Male Right Angle		LL085 = Low-Loss				SMR = SMA Male Right Angle	
For Full List of Connector Types, See Chart on Page 16						For Full List of Connector Types, See Chart on Page 16	

Semi-Rigid 086 DC to 60 GHz

Features/Benefits

- Mode Free Operation to 60 GHz
- Superior Shielding Effectiveness
- Stainless Steel Connectors Available
- Phase Matched Sets Available
(Standard Tolerance is \pm One Degree per GHz)
- Maintains Tightly Controlled Mechanical Configurations
- High Vibration Resistance
- Space Qualified
- Light Weight

Applications

- Instrumentation
- Jumpers
- Military
- Satellites
- Space Applications
- Test Cables

Quick Spec.

Frequency GHz	Typical Loss dB/100ft
1	19.2
10	69
18	98
26	123
40	162
60	211

Bend Radius: 0.125 inches (3.2mm)

ANEXO 2. SR-141



Semi-Rigid 141 offers high performance to 35 GHz with moderate insertion loss. The .141 diameter size cable matches well with high frequency connectors such as 2.9mm, BMA and SMA connectors. Florida RF Labs® offers Space Qualified assemblies bent to your specifications with a wide range of connectors.

Cable Types

.141 DIA.	Cable Code	Jacket Material	Finish
M17/130-RG402	RG402	Copper	None
M17/130-00005	402TP	Copper	Tin
M17/130-00009	AL141	Aluminum	Tin
Low-Loss	LL141	Copper	Tin

SMSR Connectors

RG402 cable can be pre-bent to 90 degrees before soldering a low profile SMA plug forming a right angle with a height profile less than a standard right angle connector. This pre-bent right angle is lower in cost and has no electrical performance degradation as with standard right angles.
(See Pre-Bent right angle dimensions for RG402 on page 48)

Part Numbering Code for Semi-Rigid 141

KMS	-	RG402	-	12.0	-	KMS
Connector #1		Cable Code		Length (in.)		Connector #2
KMS = 2.9 mm Male Straight		RG402 = M17/130-RG402		Example:		KMS = 2.9 mm Male Straight
KFS = 2.9 mm Female Straight		402TP = M17/130-00005		12.0 = 12 inches		KFS = 2.9 mm Female Straight
SMS = SMA Male Straight		AL141 = M17/130-00009				SMS = SMA Male Straight
SMR = SMA Male Right Angle		LL141 = Low-Loss				SMR = SMA Male Right Angle
For Full List of Connector Types, See Chart on Page 16						For Full List of Connector Types, See Chart on Page 16

Semi-Rigid 141 DC to 35 GHz

Features/Benefits

- Mode Free Operation to 35 GHz
- Superior Shielding Effectiveness
- Stainless Steel Connectors Available
- Phase Matched Sets Available
(Standard tolerance is \pm One degree per GHz)
- Maintains Tightly Controlled Mechanical Configurations
- High Vibration Resistance
- Space Qualified
- Light Weight

Applications

- Earth Stations
- Instrumentation
- Jumpers
- Military
- Satellites
- Test Cables

Quick Spec.

Frequency GHz	Typical Loss dB/100ft
1	12
10	44
18	64
26	82
35	101

Bend Radius: 0.250 inches (6.4mm)

ANEXO 3. SEMI-RIGID CONNECTORS

SMA - 50 Ohm Connectors For Semi-Rigid Cable



ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Impedance: 50 Ohms

Frequency Range:

Plugs	0-28 GHz
Jacks	0-25 GHz

VSWR: (f = GHz)

Plugs for Cable Type	0-18 GHz	18-28 GHz
.086 semi-rigid	1.07+.01f	<1.30 Typical
.141 semi-rigid	1.05+.01f	<1.25 Typical

Jacks for Cable Type	0-18 GHz	18-25 GHz
.086 semi-rigid	1.07+.01f	<1.30 Typical
.141 semi-rigid	1.05+.01f	<1.25 Typical

Working Voltage: (Vrms maximum)

Connectors for Cable Type	Sea Level	70K Feet
.086 semi-rigid	335	85
.141 semi-rigid	500	125

Dielectric Withstanding Voltage: (Vrms minimum at sea level)

Connectors for Cable Type	
.086 semi-rigid	1000
.141 semi-rigid	1500

Corona Level: (Volts minimum at 70,000 feet)

Connectors for Cable Type	
.086 semi-rigid	250
.141 semi-rigid	375

Insertion Loss: $0.03 \sqrt{f}$ (GHz), dB maximum, tested at 10 GHz

Insulation Resistance: 5000 Megohms minimum

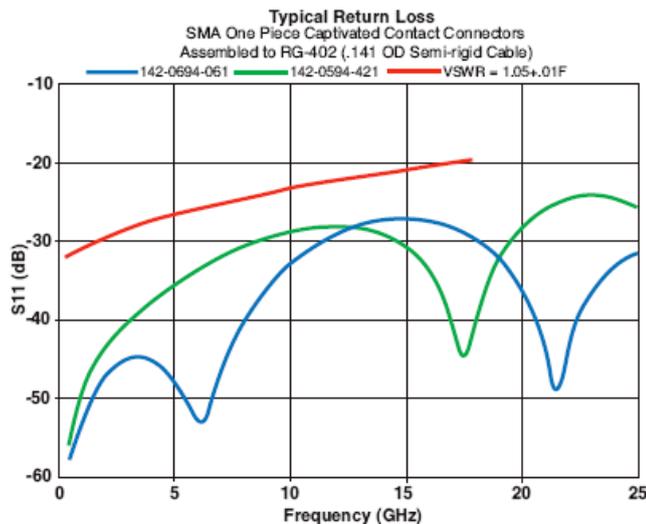
Contact Resistance: (milliohms maximum)	Initial	After Environmental
Center Contact	3.0	5.0
Outer Conductor	2.0	Not Applicable

RF Leakage: (dB minimum, tested at 2.5 GHz) -90

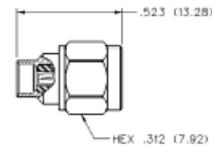
RF High Potential Withstanding Voltage:

(Vrms minimum, tested at 4 and 7 MHz)

Connectors for Cable Type	
.086 semi-rigid670
.141 semi-rigid	1000



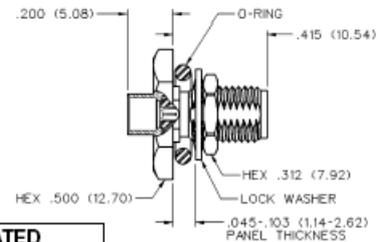
Straight Solder Type Plug With Captivated Solderless Contact, Captive Nut and Thick Wall Interface



CABLE TYPE	VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
.086 Semi-Rigid	0-18 GHz: 1.07 + .01f (GHz) 18-28 GHz: <1.30 Typical	142-0693-061	142-0693-066
.141 Semi-Rigid	0-18 GHz: 1.05 + .01f (GHz) 18-28 GHz: <1.25 Typical	142-0694-061	142-0694-066

Assembly instructions on back page.

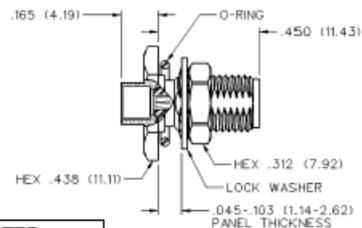
Straight Solder Type Bulkhead Jack With Captivated Solderless Contact and O-Ring



CABLE TYPE	VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
.086 Semi-Rigid	0-18 GHz: 1.07 + .01f (GHz) 18-25 GHz: <1.30 Typical	142-0593-421	142-0593-426
.141 Semi-Rigid	0-18 GHz: 1.05 + .01f (GHz) 18-25 GHz: <1.25 Typical	142-0594-421	142-0594-426

Assembly instructions and mounting hole layout on back page.

Straight Solder Type Bulkhead Jack With Captivated Solderless Contact and O-Ring



CABLE TYPE	VSWR & FREQ. RANGE	GOLD PLATED	NICKEL PLATED
.086 Semi-Rigid	0-18 GHz: 1.07 + .01f (GHz) 18-25 GHz: <1.30 Typical	142-0593-431	142-0593-436
.141 Semi-Rigid	0-18 GHz: 1.05 + .01f (GHz) 18-25 GHz: <1.25 Typical	142-0594-431	142-0594-436

Assembly instructions and mounting hole layout on back page.

ANEXO 4. STEP MOTOR M35SP-7

mitsumi

Stepping Motors M35SP-7

Stepping Motors

OUTLINE

"M35SP-7" has the thinnest body among the 35mm outer diameter model series.
Output torque characteristics-holding torque : 29.4mN·m, pull-out torque : 18.1mN·m/200pps, and pull-in torque : 17.6mN·m/200pps (6V DC).
With these torques this motor materializes an excellent size performance.



FEATURES

1. Compact size and high output torque.
2. Superior running quietness and stability.
3. Step angle : 7.5°.
4. Excellent responsiveness acquired.

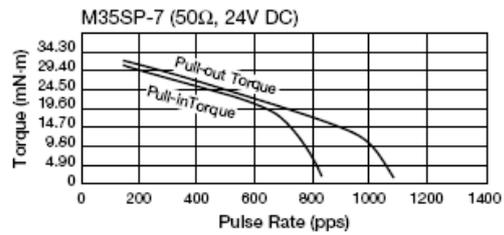
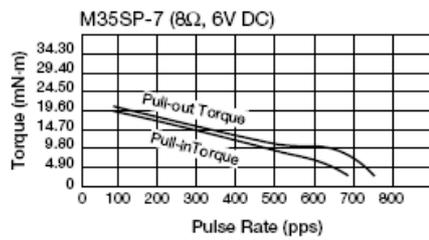
USES

Printers, multifunction machines, copy machines, FAX, and such.

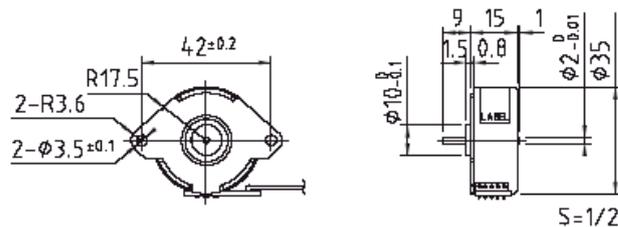
SPECIFICATIONS

Items	M35SP-7	
Rated Voltage	DC 6V	DC 24V
Working Voltage	DC 5.4-6.6V	DC 21.6-26.4V
Rated Current/Phase	807mA max.	517mA
No. of Phase	4 Phase	4 Phase
Coil DC Resistance	8Ω/phase±7%	50Ω/phase±7%
Step Angle	7.5°/step	7.5°/step
Excitation Method	2-2 Phase excitation (Unipolar driving)	
Insulation Class	Class E insulation	Class E insulation
Holding Torque	29.4mN·m	34.3mN·m
Pull-out Torque	18.1mN·m/200pps	31.4mN·m/200pps
Pull-in Torque	17.6mN·m/200pps	30.9mN·m/200pps
Max. Pull-out Pulse Rate	770pps	1,050pps
Max. Pull-in Pulse Rate	710pps	850pps

CHARACTERISTICS



DIMENSIONS



Unit : mm, General tolerance : ±0.5