

EMPREGO DO SOFTWARE MSTRIP COMO FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DE ANTENAS DE MICROFITA

Aldair Rodrigues Gomes Junior

Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telecomunicações – CEFET-PB
Av. Primeiro de Maio, 720 Jaguaribe CEP 58.015-430 João Pessoa-PB
E-mail: aldair_jr@yahoo.com.br

Alfredo Gomes Neto

Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telecomunicações – CEFET-PB
Av. Primeiro de Maio, 720 Jaguaribe CEP 58.015-430 João Pessoa-PB
E-mail: alfredogomes@ieee.org

RESUMO

Com o avanço crescente das tecnologias de telecomunicações, a importância de uma formação educacional de qualidade torna-se vital, tanto para o mercado de trabalho quanto para a carreira acadêmica. Como a produção de material nesta área ainda está em desenvolvimento, há uma carência de ferramentas que auxiliem este processo de aprendizagem. Assim, o objetivo deste trabalho é comprovar a eficiência do *software* MSTRIP através da simulação numérica de diversos fenômenos que ocorrem em uma antena de microfita em funcionamento. A metodologia empregada constou primeiramente de uma análise de dados de antenas existentes. Logo após, as mesmas foram projetadas e simuladas no programa. Os dados foram coletados para posterior comparação, a fim de determinar as aproximações entre os valores reais e os obtidos através da experimentação. O resultado alcançado demonstrou que o *software* MSTRIP é uma ferramenta eficiente tanto para o desenvolvimento de projetos de antenas de microfita como para modelo educacional de simulação, com margens de erro toleráveis para as devidas aplicações.

PALAVRAS-CHAVE: tecnologia em telecomunicações; antenas de microfita; educação; mstrip.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho, intitulado “*Emprego do software MSTRIP como ferramenta de simulação de antenas de microfita*”, tem como objetivo principal comprovar a eficiência do *software* alemão MSTRIP como uma boa ferramenta educacional e de elaboração de projetos, ao simular numericamente diversos fenômenos que ocorrem em antenas de microfita, ao se analisar os resultados medidos nos experimentos e os obtidos a partir de uma antena existente.

Este trabalho está inserido no contexto da aplicação de programas de computador utilizados como auxílio em vários ramos de tecnologia, especificamente na área de telecomunicações. Ainda há pouco material desenvolvido sob estes aspectos, e geralmente a divulgação é limitada, fazendo com que a maioria das instituições faça uso de um conjunto restrito de programas, muitas vezes a custos altos, com limitações impostas pelos fabricantes. Os trabalhos independentes, muitas vezes elaborados por professores e alunos universitários, ou até mesmo por profissionais liberais da área, carecem do devido apoio para se popularizarem. Porém é visível a expansão do movimento do *software* livre, tanto no meio acadêmico quanto no meio corporativo, categoria da qual faz parte o MSTRIP.

As antenas de microfita, muito utilizadas por seu baixo custo e relativa facilidade de fabricação, possuem poucas aplicações computacionais que permitam verificar seu funcionamento em ambiente simulado, para aplicação didática da teoria das mesmas ou em testes para a criação de uma nova antena, por exemplo. Assim, o *software* desenvolvido por Splitt (2000) aparece neste contexto como uma opção a ser devidamente analisada e verificada.

Diante disto, deve-se perguntar: o programa MSTRIP pode ser considerado como uma alternativa boa e viável para simulação de fenômenos que ocorrem em antenas de microfita, e consequentemente como uma ferramenta adequada para o ensino na área de telecomunicações e para análise de projetos?

Para este trabalho um dos procedimentos metodológicos adotados foi a pesquisa bibliográfica, para melhor entendimento teórico do universo das antenas microfita, além de exemplos documentados de antenas fabricadas e testadas. Inclui-se nesta pesquisa a documentação disponível sobre o programa de computador em questão, como seu manual e práticas laboratoriais seguidas de exemplos. Outra metodologia foi a simulação numérica, onde as antenas pesquisadas, abrangendo as formas retangulares e circulares, foram moldadas no *software* e simuladas. Parâmetros como *VSWR*, diagrama de irradiação, diagrama de correntes e frequência de ressonância são coletados e comparados com os valores descritos na literatura, para posterior comparação.

2. ANTENAS DE MICROFITA

A cada dia, novas tecnologias são pesquisadas e lançadas em ritmo acelerado. Na área de telecomunicações isto não é exceção. Novas formas de melhorar a qualidade e o acesso dos serviços de comunicação são alvos de vários estudos. Neste universo, as antenas têm um papel significativo nestas pesquisas.

A antena de microfita é um caso especial de dispositivo de recepção e transmissão. Em aplicações de alto desempenho, como aviões e satélites, onde fatores como custo, tamanho e performances são decisivos, as antenas de microfita são bastante utilizadas. Elas são pequenas, são de fácil fabricação (mesma tecnologia dos circuitos impressos) e servem para estruturas planas e não-planas. Além disto, características como frequência de ressonância, impedância e polarização podem ser definidas durante o processo de projeto e fabricação (Balanis, 2004).

Apesar disto, as antenas de microfita apresentam algumas desvantagens, como baixa potência, baixa eficiência e frequência de largura de banda limitada, o que pode prejudicar seu uso em aplicações críticas. Contudo, existem métodos que podem ajudar a atenuar estas deficiências, como a manipulação do tamanho dos substratos.

2.1. Características Básicas

Conforme Balanis (2004), as antenas de microfita começaram a receber considerável atenção a partir da década de 70. São constituídas por finos eletrodos metálicos em forma de fitas, fotolitografadas em um suporte isolador. Os eletrodos estão dispostos alternadamente com distâncias entre si da ordem das dezenas de microns. Desta forma, não é necessário aplicar tensões elevadas para um correto funcionamento da antena. As fitas e o plano de terra (suporte isolador) são separados por uma camada de material dielétrico conhecida por substrato.

Diferentes tipos de materiais são usados como substrato, com constantes dielétricas variando geralmente entre 2,2 e 12, que acabam influenciando consideravelmente no desempenho da antena. Antenas com valores baixos de constante são mais usadas e desejadas, por proverem melhor eficiência e grande largura de banda, à custa de um tamanho maior do substrato. Já antenas com valores altos de constante dielétrica são desaconselháveis por apresentarem baixa eficiência, largura de banda baixa e grandes perdas.

As antenas de microfita também são conhecidas por *patches*. Dependendo da aplicação, o *patch* pode assumir variados formatos: quadrado, circular, retangular, dipolo retangular, elíptico, triangular e outros. As formas mais comuns são a quadrada, a retangular, a circular e dipolo, pois possuem características de irradiação peculiares, além da facilidade de fabricação e análise (Fig. 01). O formato dipolo é bastante atrativo por ocupar menos espaço que os outros, e por permitir grande largura de banda.

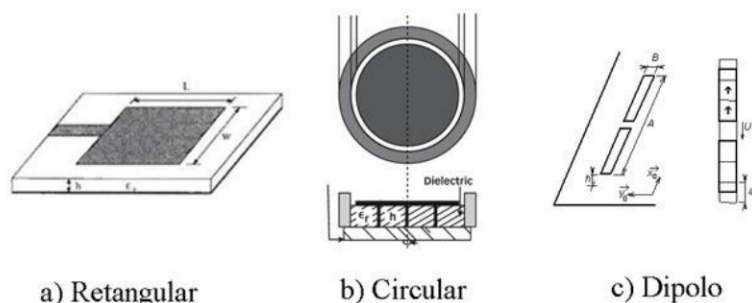


Figura 01 – Geometrias retangular, circular e dipolo.

As antenas de microfita podem ser alimentadas de diversas maneiras. As mais populares são: linha de microfita, via cabo coaxial, acoplamento de abertura e acoplamento de proximidade (Fig. 02). No método de alimentação da linha de microfita, a mesma é uma linha de condução, muito menor que o *patch* de irradiação. São fáceis de modelar e fabricar, porém possui largura de banda limitada dependendo da espessura do substrato (Balanis, 2004).

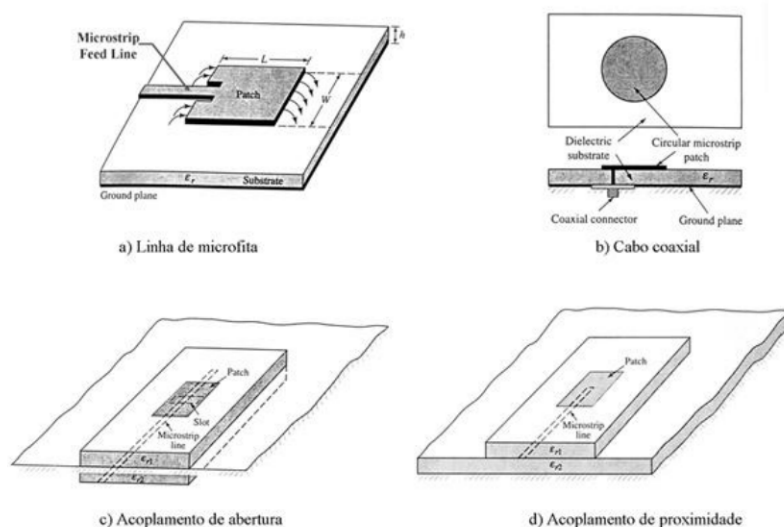


Figura 02 – Métodos de alimentação.

No caso de uso de cabo coaxial, o condutor interno do cabo é conectado com o *patch*, enquanto que o condutor externo é conectado ao terra. Este modelo é de fácil fabricação, porém de difícil modelagem e com largura de banda estreita.

Os métodos de acoplamento são os de mais difícil fabricação, principalmente o de acoplamento de abertura. Possuem largura de banda estreita, mas são fáceis de modelar e têm radiação de modos espúrios moderada. O método de acoplamento de abertura consiste de dois substratos separados por um plano de terra. Abaixo do menor substrato há uma linha de alimentação de microfita que fornece energia através de um *slot* no plano de terra. Este arranjo permite uma otimização independente do mecanismo de alimentação e do elemento de irradiação.

Existem diversos métodos numéricos para análise de antenas de microfita. Os mais populares são o modelo da linha de transmissão, modelo da cavidade e o método dos momentos.

O método da linha de transmissão é considerado o mais simples, porém o de menor precisão e com uso limitado a *patches* retangulares. Neste modelo, conforme Costa e Silva (2005), a antena é representada como um arranjo de duas fendas radiantes de largura W e altura h , separadas por uma linha de transmissão de comprimento L , por onde o campo varia. As fendas funcionam como dipolos magnéticos. Parâmetros como frequência de ressonância e impedância de entrada são obtidos através deste modelo.

No modelo da cavidade, a antena é representada por uma cavidade limitada por condutores elétricos e preenchida por material dielétrico. Através da observação dos modos ressonantes, parâmetros como frequência de ressonância e diagrama de irradiação são calculados.

O método dos momentos tem como princípio básico a expansão da distribuição de corrente no *patch*, através da solução de uma equação integral que é discretizada em uma equação matricial. Através da resolução desta equação matricial, a distribuição de corrente é obtida. O grande inconveniente deste método, apesar do mesmo poder ser utilizado para vários modelos de alimentação e para estruturas montadas em grandes planos de terra, é a exigência de grande capacidade de processamento.

Costa e Silva (2005) cita ainda os métodos das diferenças finitas, dos elementos finitos (FEM), dos elementos finitos de fronteira, da equação integral, do casamento modal, das linhas, da matriz de espalhamento generalizada (S), do domínio espectral, do circuito planar e a Técnica da Ressonância Transversa, tema de sua tese.

2.2. Antenas de Microfita Retangulares

Os *patches* retangulares são uma das configurações mais usadas para antenas de microfita. Podem ser analisados com relativa precisão e facilidade através dos modelos da linha de transmissão e da cavidade.

Basicamente, no modelo da linha de transmissão, a antena é representada por dois *slots* separados por uma linha de transmissão de tamanho L . O procedimento para o projeto da antena de microfita segue um roteiro, onde primeiro deve-se definir a constante dielétrica do substrato (ϵ_r), a frequência de ressonância (f_r) e a altura do substrato (h).

O comprimento W ideal para irradiação eficiente é calculado através da seguinte fórmula (Balanis, 2004):

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r} + 1} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r} + 1} \quad (01)$$

onde v_0 é a velocidade da luz no vácuo.

Após isto, a constante dielétrica efetiva é calculada (com $W/h > 1$) (Balanis, 2004):

$$\epsilon_{rff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (02)$$

Determina-se a distância ΔL pela expressão (Balanis, 2004):

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{rff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{rff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (03)$$

É possível então calcular o comprimento real do *patch* (Balanis, 2004):

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (04)$$

Reunidos estes parâmetros, após a conclusão do projeto da antena, é possível calcular outros dados, como a impedância de entrada e resistência ressonante de entrada.

2.2. Antenas de Microfita Circulares

Junto com os *patches* retangulares, os modelos circulares são as mais populares configurações de antenas de microfita. Neles, parâmetros como L e W são convenientemente substituídos pelo raio a . Esse valor influencia no cálculo da frequência de ressonância.

À exceção do método dos momentos, os *patches* circulares só podem ser analisados de maneira adequada usando o método da cavidade, de forma similar aos *patches* retangulares, só que usando coordenadas cilíndricas.

O procedimento para o projeto da estrutura lembra o da retangular, que se inicia com as definições da constante dielétrica do substrato (ϵ_r), a frequência de ressonância (f_r , para diversos modos, geralmente o fundamental) e o tamanho do substrato (h , em cm). Com estes valores, calcula-se o raio (Balanis, 2004):

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (05)$$

Onde (Balanis, 2004):

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (06)$$

Com a estrutura desenhada, outros dados podem ser calculados, como a resistência de entrada e a diretividade.

3. MSTRIP

O *software* MSTRIP (Splitt, 2000), produzido pelo Prof. Dr. Georg Splitt, da *Fachbereich Elektrotechnik* de Kiel, Alemanha, é escrito nas linguagens de programação C++, MFC e Fortran. Encontra-se disponível gratuitamente no site pessoal de seu autor, e é compatível com sistemas operacionais Windows. Seus requisitos operacionais mínimos (processador de 133 MHz e 4 *Mbytes* de memória RAM) o tornam apropriado para ser executado em qualquer máquina dos dias de hoje.

Diversos exemplos de antenas pré-definidas acompanham o programa, muito úteis em um primeiro contato, principalmente para usuários que sintam certa dificuldade inicial. É necessário ressaltar que entres estes exemplos, não existe algum que se refira a antenas circulares, tipo de geometria com a qual o programa apresenta limitações. Vantagens como análise de até cinco camadas de dielétrico, estrutura de antenas de microfita em até quatro camadas, opção de impressão para quase todos os módulos e simplicidade de operação contrastam com algumas restrições, como análise limitada em casos com múltiplas portas, dificuldades de simulação com antenas de geometria circular e sistema de projeto de estrutura trabalhoso. É sempre necessário lembrar que o MSTRIP é um projeto acadêmico, desenvolvido inicialmente para fins didáticos, e sem objetivos comerciais.

3.1. Módulos do Mstrip

Ao ser aberto, o programa exibirá seu módulo principal (Fig. 03), onde é possível determinar os parâmetros gerais da antena de microfita a ser analisada, como: frequência inicial e final, dimensões dos segmentos, permissividade e espessura do dielétrico, perdas, dados de precisão para os cálculos numéricos e outros.

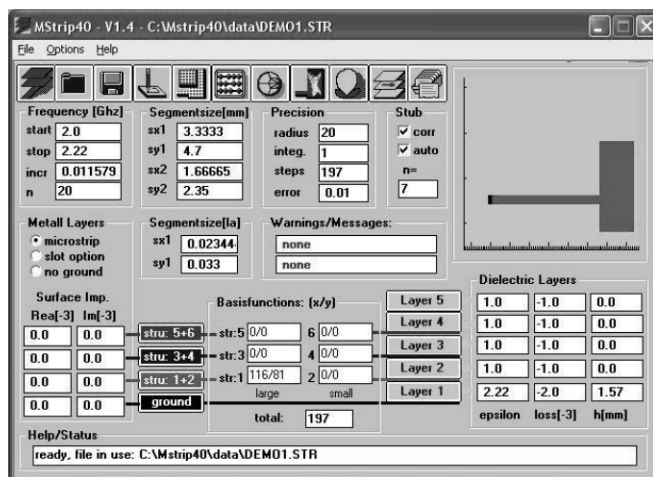


Figura 03 – Módulo principal do MSTRIP.

É possível encontrar também ícones de atalho para outros módulos, como por exemplo, o da edição da estrutura da antena. O projeto da estrutura pode ser feito através de um editor de texto comum, a ser definido pelo usuário. Através do uso de caracteres ASCII, a geometria do *patch* é desenhada, gerando um arquivo de estrutura, que segue um padrão de *layout* para posterior processamento pelo programa, onde os parâmetros gerais anteriormente citados também são incluídos. Este arquivo passa a ser indispensável para todas as outras etapas de simulação do MSTRIP.

Ao se clicar no ícone de um ábaco, o módulo de cálculo é acionado. O arquivo de estrutura selecionado é executado. Nesta etapa, conforme Leung (2002), é utilizado um método de análise de momentos que usa as equações de Maxwell e métodos de integração para processar os vários parâmetros da antena. Em uma primeira etapa, são calculadas integrais de acordo com as dimensões dos segmentos e os dados do dielétrico. Conforme a faixa de frequência, o número de iterações e a taxa mínima de erro, as integrais são recalculadas, levando em conta a geometria da antena. Dependendo da velocidade do processador e da complexidade da estrutura, o tempo deste cálculo pode variar de poucos segundos a vários minutos.

Após o processamento dos dados, são disponibilizados outros módulos. Um deles, representado pelo símbolo de uma carta de Smith, mostra um diagrama detalhado (Fig. 04), que contém informações como impedância de entrada e *VSWR*, em pontos com grau, magnitude e atenuação próprios, que variam de acordo com a faixa de frequência especificada, com a quantidade de pontos igual ao número de iterações determinada.

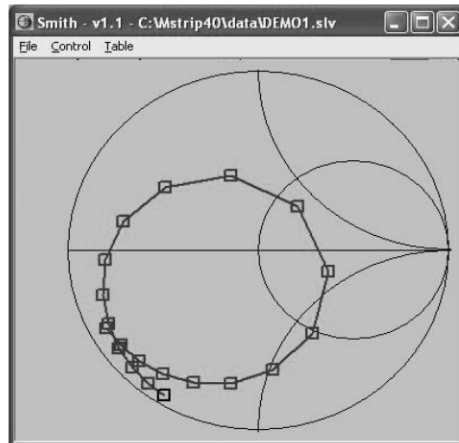


Figura 04 – Módulo de *VSWR*.

Há também o módulo correspondente à distribuição de correntes do *patch*, onde um diagrama permite visualizar as correntes que passam por cada camada da antena. É utilizado um sistema de plotagem em cores, onde as mesmas, através de uma tabela específica, determinam a intensidade da corrente. Um simples comando permite alternar a visualização em duas (Fig. 05) ou três dimensões, permitindo ao usuário uma melhor interpretação dos dados apresentados. Da mesma forma que o módulo anterior, este também varia conforme a faixa de frequência e o número de iterações.

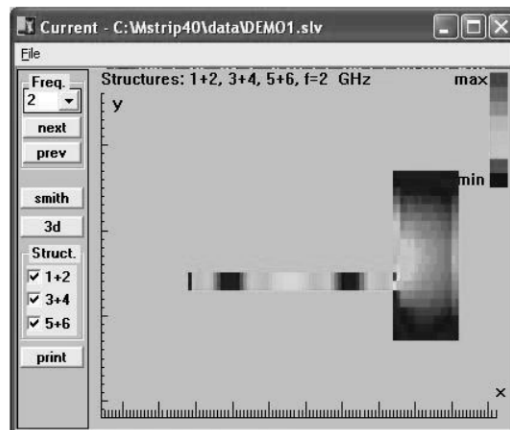


Figura 05 – Módulo de distribuição de correntes em duas dimensões

O diagrama de irradiação da antena é objeto principal de mais um módulo. Primeiramente é exibido um gráfico de coordenadas polares em três dimensões (Fig. 06), onde é permitido interpretar parâmetros, como ganho e eficiência, através de um esquema de cores similar ao módulo do diagrama de correntes. Este gráfico pode ser alternado para um esquema de coordenadas cartesianas, e o tipo da polarização, linear ou circular também pode ser definido, além da opção para visualização em duas dimensões.

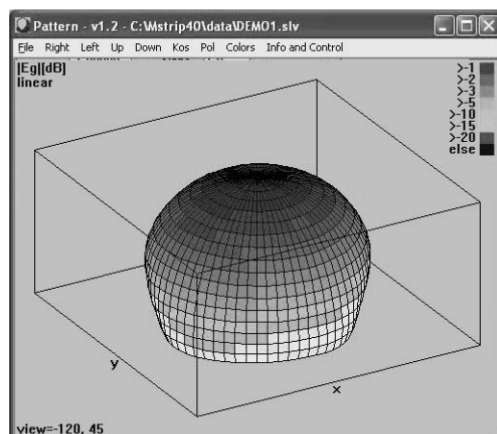


Figura 06 – Módulo do diagrama de irradiação em três dimensões.

Com o último módulo é possível criar arquivos *batch*, necessários para processamentos mais poderosos, e consequentemente mais lentos, devido a uma grande quantidade de segmentos ou a uma grande faixa de frequência com muitos pontos de iteração. Desta forma, evita-se que o usuário precise mudar diversas vezes os dados iniciais, automatizando o processo.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1. Antenas Para Análise

A fim de comparar os resultados obtidos foram usados como referência o artigo de Costa e Silva (2006) e o exemplo de Balanis (2004), onde são apresentados modelos de antenas de microfita. Quatro modelos, sendo dois *patches* retangulares (Tabela I) e dois circulares (Tabela II), foram escolhidos para tomarem parte da simulação.

| Tabela I: Antenas de microfita retangulares | | | | | | | | |
|---|-----------------|--------|--------|--------|--------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Ref. | Nº <i>patch</i> | h (mm) | L (mm) | W (mm) | ϵ_r | f_r (MLT) (GHz) | f_r (MM) (GHz) | f_r (MTRT) (GHz) |
| Balanis (2004) | 1 | 1,588 | 9,06 | 11,86 | 2,2 | 10 | - | - |
| Costa e Silva (2006) | 2 | 1,52 | 12 | 20 | 2,22 | - | 7,55 | 7,5 |

| Tabela II: Antenas de microfita circulares | | | | | | |
|--|-----------------|--------|--------|--------------|--------------------|--------------------|
| Ref. | Nº <i>patch</i> | h (mm) | r (mm) | ϵ_r | f_r (exp.) (GHz) | f_r (MTRT) (GHz) |
| Costa e Silva (2006) | 3 | 2,35 | 7,7 | 4,55 | 4,945 | 4,921 |
| Costa e Silva (2006) | 4 | 1,5875 | 7,4 | 2,65 | 6,634 | 6,562 |

Os valores acima citados foram determinados através dos métodos do modelo da linha de transmissão (caso 1), método dos momentos (caso 2), método da Técnica da Ressonância Transversa (casos 1, 2, 3 e 4) e por medição em laboratório (casos 3 e 4).

Tais modelos foram escolhidos propositalmente por serem simples, e servirem ao propósito inicial de demonstrar as funcionalidades do programa MSTRIP.

4.2. Simulação

O primeiro passo para a realização da simulação foi o projeto das antenas, feito em um editor de texto simples, através de caracteres ASCII pré-definidos pelo *software*.

O arquivo onde o projeto é editado é o arquivo de estrutura (*.str), onde outros parâmetros iniciais da antena de microfitas também são dispostos. Para cada caso, existe um único arquivo, gerando-se então um total de quatro. Basicamente, os caracteres usados em cada caso podem ser vistos na Tabela III:

| Tabela III: Caracteres ASCII usados | |
|-------------------------------------|--|
| Caracter | Finalidade |
| # | Preenchimento do corpo do <i>patch</i> |
| 1 | Porta ou entrada de alimentação |
| . | Espaços não preenchidos pelo <i>patch</i> na placa |

Como o MSTRIP trabalha com o conceito de segmento (pequenos blocos retangulares de tamanho definido), cada *patch* foi composto por vários destes ‘pedaços’. Desta forma, tornou-se necessário para cada caso se fazer cálculos envolvendo as dimensões da antena juntamente com as dimensões de cada segmento, de forma a se obter a quantidade exata de segmentos para cada projeto.

É de rápida dedução que, para obter uma aproximação maior, a quantidade de segmentos por figura também deve ser aumentada. Contudo, um maior processamento para a resolução numérica das integrais envolvidas também se faz necessário.

Concluídos os projetos de cada antena, os parâmetros iniciais, como h e ϵ_r , além das dimensões do segmento empregado, foram inseridos através da tela principal do programa (e adicionados automaticamente ao arquivo de estrutura correspondente).

Necessário se fez, para efeito da simulação, a determinação de faixas de frequências para cada exemplo, a fim de se observar o comportamento de determinados parâmetros, como o *VSWR*. Além disto, este procedimento facilita a busca pelas condições ideais de propagação e irradiação de cada antena, evitando-se assim repetir o processo de cálculo numérico, que pode durar vários minutos ou até mesmo horas, dependendo da capacidade e velocidade de processamento do computador utilizado, várias vezes.

Feito isto, através do módulo de cálculo, os casos foram processados, um de cada vez, e suas integrais foram calculadas, segundo o método de análise dos momentos.

4.2.1. Antenas retangulares: Para os modelos retangulares (Tabelas IV e V), o processo de projeto das antenas de microfitas ocorreu sem muitos contratempos, devido principalmente à natureza dos segmentos, que também são retangulares.

| Tabela IV: Dimensões dos segmentos – casos retangulares | | | |
|---|-----------------|---------|---------|
| Ref. | Nº <i>patch</i> | Sx (mm) | Sy (mm) |
| Balanis (2004) | 1 | 1,82 | 0,514 |
| Costa e Silva (2006) | 2 | 2,4 | 1,2 |

| Tabela V: Faixas de frequência e número de iterações – casos retangulares | | | | |
|---|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Ref. | Nº <i>patch</i> | Frequência inicial (GHz) | Frequência final (GHz) | Nº de iterações |
| Balanis (2004) | 1 | 9,4 | 10,7 | 30 |
| Costa e Silva (2006) | 2 | 7,5 | 7,7 | 10 |

4.2.1. Antenas circulares: A forma retangular dos segmentos acarretou em uma maior dificuldade de elaboração dos projetos para as antenas circulares (Tabelas VI e VII). A forma encontrada para amenizar tal situação foi criar estruturas que, mesmo formadas por blocos, se aproximassem o máximo de uma geometria circular.

A estratégia adotada neste trabalho, para os modelos circulares, consistiu de se começar a simulação com poucos segmentos (conseqüentemente gerando figuras de formas bastante diferentes de círculos), e aumentar a quantidade dos mesmos gradativamente, observando-se os resultados de cada simulação até se encontrar valores satisfatórios, sempre respeitando a relação entre as dimensões reais dos *patches* e dos segmentos.

| Tabela VI: Dimensões dos segmentos – casos circulares | | | |
|---|-----------------|---------|---------|
| Ref. | Nº <i>patch</i> | Sx (mm) | Sy (mm) |
| Costa e Silva (2006) | 3 | 0,66956 | 0,66956 |
| Costa e Silva (2006) | 4 | 0,98666 | 0,98666 |

| Tabela VII: Faixas de frequência e número de iterações – casos circulares | | | | |
|---|-----------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Ref. | Nº <i>patch</i> | Frequência inicial (GHz) | Frequência final (GHz) | Nº de iterações |
| Costa e Silva (2006) | 3 | 4,8 | 4,84 | 10 |
| Costa e Silva (2006) | 4 | 6,4 | 6,7 | 10 |

Os modelos circulares, tanto no projeto do arquivo de estrutura quanto no módulo de visão detalhada, tomaram uma forma de elipse. Isto aconteceu devido a uma ‘distorção’ natural causada pelo programa para contexto de visualização. Porém o processamento feito continuou a considerá-los como de forma circular.

4.3. Análise dos Dados Numéricos

Logo após o término dos cálculos numéricos, foi possível coletar e analisar várias informações disponibilizadas pelos módulos do MSTRIP. Cada caso apresentou dados peculiares.

4.3.1. Caso nº1 - retangular: Este exemplo apresentou valores de *VSWR* bastante próximos de 1 na faixa de frequência especificada. O melhor valor encontrado foi aproximadamente 1,023, para a frequência de 10,431 GHz (Fig. 07).

Para a distribuição de correntes, a periferia e o centro do *patch*, além da porta de alimentação, tiveram os maiores valores.

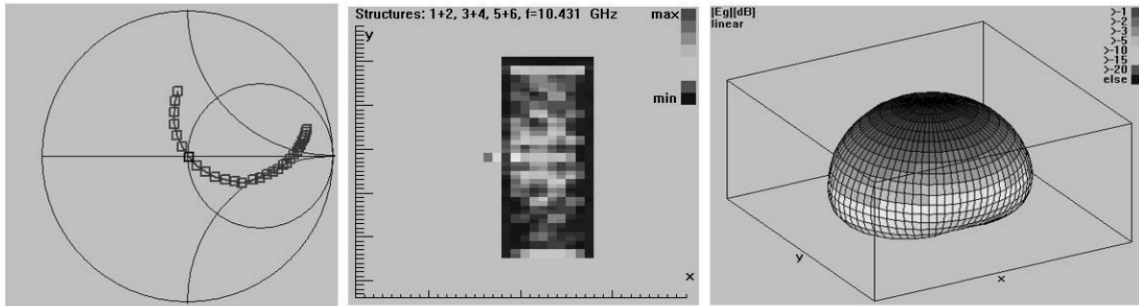


Figura 07 – Carta de Smith, diagrama de distribuição de correntes e diagrama de irradiação para o caso 1.

4.3.2. Caso nº2 - retangular: Similarmente ao exemplo anterior, este caso apresentou uma carta de Smith com $VSWR$ muito próximo de 1. Para a frequência de 7,633 GHz, obteve-se 1,067 (Fig. 08).

A distribuição de correntes apresentou patamares elevados novamente no centro, na periferia e na porta de alimentação.

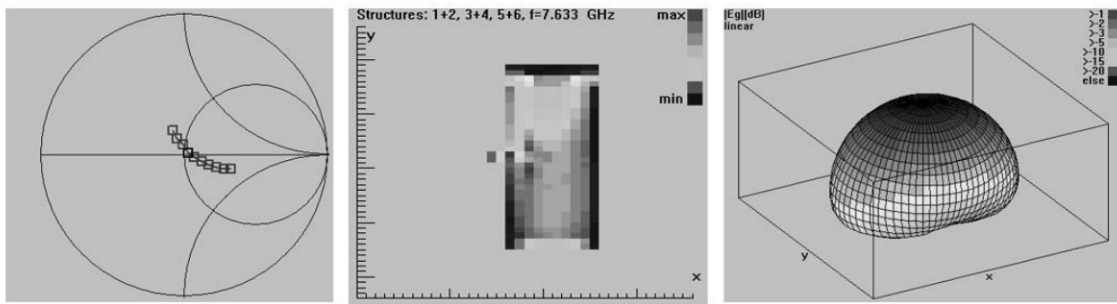


Figura 08 – Carta de Smith, diagrama de distribuição de correntes e diagrama de irradiação para o caso 2.

4.3.3. Caso nº3 - circular: Para este exemplo, apesar da geometria circular, foi encontrado um valor adequado de $VSWR$. O mais próximo de 1 que foi possível chegar foi na frequência aproximada de 4,827 GHz, com o valor de 1,198 (Fig. 09).

A distribuição de correntes se mostrou alta ao longo da linha de alimentação do *patch*. A parte central mostrou um crescimento gradativo, em direção das bordas, onde se acentuam.

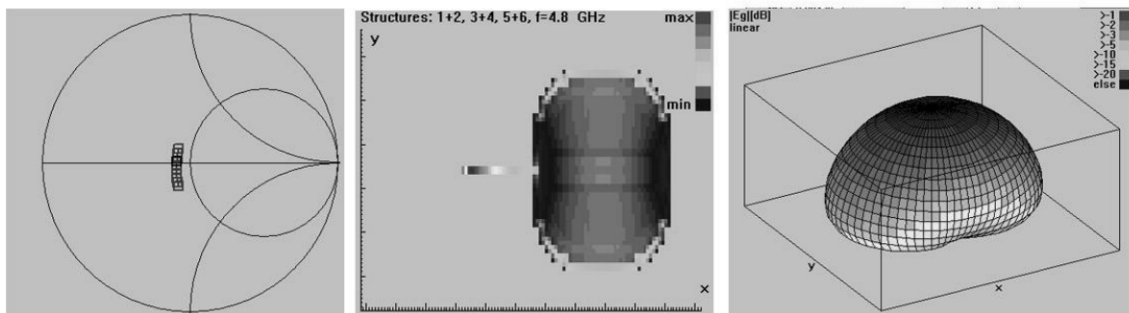


Figura 09 – Carta de Smith, diagrama de distribuição de correntes e diagrama de irradiação para o caso 3.

4.3.4. Caso n°4 - circular: Este caso, mesmo sendo circular, apresentou um resultado mais satisfatório em termos de *VSWR* para a faixa de frequência determinada. O maior valor encontrado foi 1,2, para aproximadamente 6,533 Ghz (Fig. 10).

As correntes se distribuíram de forma semelhante ao modelo anterior.

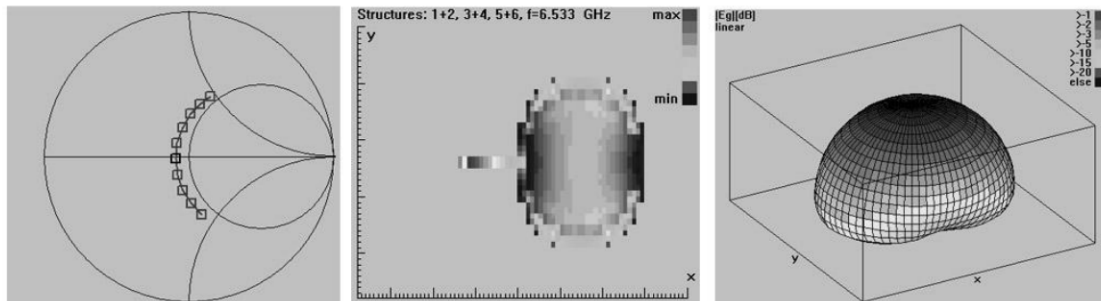


Figura 10 – Carta de Smith, diagrama de distribuição de correntes e diagrama de irradiação para o caso 4.

4.4. Resultados

Os modelos retangulares apresentaram valores satisfatórios e próximos dos obtidos por experimentação das antenas reais.

Os modelos circulares impuseram uma maior dificuldade de obtenção dos valores de maior eficiência, causada em parte pelas limitações impostas pelo programa, e pelo método de análise disponibilizado pelo mesmo. Mas isto não impossibilitou de se obter resultados até certo ponto aceitáveis.

O dado obtido mais significativo para elaboração de resultados para este trabalho foi o valor de *VSWR*. Através deste, tornou-se possível visualizar a frequência de ressonância de cada antena, dentro das faixas determinadas na fase experimental, e verificar sua correspondência com os valores reais.

Nas tabelas VIII e IX são determinadas as margens de erro para cada exemplo, obtidas através da razão entre os valores obtidos na simulação do MSTRIP e os valores das antenas reais.

| Tabela VIII: Margens de erro – modelos retangulares | | | | | | | | |
|---|----------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| Ref. | Nº patch | f_r (MLT) (GHz) | f_r (MM) (GHz) | f_r (MTRT) (GHz) | f_r MSTRIP (GHz) | Erro MLT (%) | Erro MM (%) | Erro MTRT (%) |
| Balanis (2004) | 1 | 10 | - | - | 10,431 | 4,3 | - | - |
| Costa e Silva (2006) | 2 | - | 7,55 | 7,5 | 7,633 | - | 1,1 | 1,7 |

| Tabela IX: Margens de erro – modelos circulares | | | | | | |
|---|----------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| Ref. | Nº patch | f_r (exp.) (GHz) | f_r (MTRT) (GHz) | f_r MSTRIP (GHz) | Erro (exp.) (%) | Erro MTRT (%) |
| Costa e Silva (2006) | 3 | 4,945 | 4,921 | 4,827 | 2,4 | 1,9 |
| Costa e Silva (2006) | 4 | 6,634 | 6,562 | 6,533 | 1,5 | 0,4 |

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de programas de computador como ferramentas de auxílio e simulação na área de Telecomunicações, de forma acessível a ambientes acadêmicos, apesar de ser um processo ainda lento, torna-se uma realidade observável.

Nesta ótica, o aplicativo aqui apresentado, apesar de bastante simples e com limitações, vislumbra um horizonte novo. Feito por um acadêmico, e voltado para acadêmicos, o *software* MSTRIP se mostrou um acessório eficaz para o contexto.

As dificuldades encontradas, principalmente na etapa de projeto, deveram-se em parte ao ainda rudimentar sistema de projeto de estrutura dos *patches*, que consumiu fatia considerável de tempo do projeto.

Outro empecilho foi a limitação quanto à geometria circular das antenas, devido ao sistema de segmentos, que são retangulares. Mesmo assim, como uma das contribuições deste trabalho, foi possível trabalhar com estas características.

Os resultados coletados na fase de experimentação, entre eles destacando-se a frequência de ressonância ideal para cada caso, tiveram uma margem de erro de menos de 5% em relação ao das antenas reais, o que os configura como aceitáveis, levando em conta a natureza e a finalidade da aplicação.

De forma geral, o MSTRIP demonstrou ser bastante simples de ser operado, com uma interface amigável e sem procedimentos complexos. Essas características o tornam um objeto auxiliador eficiente para fins didáticos, com especial atenção para disciplinas como teoria das antenas de microfita.

Para aplicações de projeto, com fins profissionais, o MSTRIP ainda apresenta limitações. Porém, para aplicações simples pode ser de grande utilidade, como por exemplo, em etapas iniciais de projetos.

Recomenda-se que sejam feitos mais testes, para averiguar outras funcionalidades que na foram exploradas neste trabalho.

Sugere-se também que, em conjunto com o autor do programa, se desenvolvam outros módulos que possam agilizar o desempenho do programa, como configurações pré-definidas de interfaces de impedância e de camadas de dielétricos, além de um modo específico para a análise dos dielétricos.

Outra possibilidade é a implementação de uma interface mais elaborada para a construção dos projetos de *patches*, que permita, inclusive desenvolver geometrias circulares ou elípticas com maior rapidez e facilidade.

Também é recomendado desenvolver-se uma versão da aplicação na língua portuguesa, de forma a facilitar o uso do programa para usuários que sintam dificuldades em interpretar outros idiomas.

6. REFERÊNCIAS

BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory**. 3rd ed. New Jersey: Wiley & Sons Inc., 2005. p. 811-882.

COSTA E SILVA, J. **Análise dos modos ressonantes em antenas de microfita sobre substratos iso/anisotrópicos por técnicas da ressonância transversa**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

COSTA E SILVA, J. **Determinação da frequência de ressonância de antenas de microfita com patch circular sobre substratos iso/anisotrópicos, utilizando técnicas de ressonância transversa**. Belo Horizonte: MOM AG, 2006.

LEUNG, M. **Microstrip antenna design using MSTRIP40**: Laboratory Manual. University of Canberra, Canberra, 2002. Disponível em: <<http://e-technik.fh-kiel.de/~splitt/html/MSTRIP40LabManual.pdf>>

SPLITT, G. **Mstrip40 Version 1.4**. [S.I.], 2000. Disponível em: <<http://www.e-technik.fh-kiel.de/~splitt/html/MSTRIP40.zip>>