

Stênio Flávio de Lacerda Fernandes

Aplicação da Técnica da Ressonância Transversa
Modificada em Linhas de Microfita Multicamadas
com Segmentação Vertical

Dissertação submetida ao corpo docente da Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Marcos Antonio Barbosa de Melo- UFPB - CCT - DEE
Orientador

Creso Santos da Rocha - UFPB - CCT - DEE
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Stênio Flávio de Lacerda Fernandes, 1996



F363a Fernandes, Stenio Flavio de Lacerda
Aplicacao da tecnica da ressonancia transversa modificada em linhas de microfita multicamadas com segmentacao vertical / Stenio Flavio de Lacerda Fernandes. - Campina Grande, 1996.
89 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Tecnica da Ressonancia Transversa Modificada (MTRT)
2. Ressonancia Transversa 3. Dissertacao I. Melo, Marcos Antonio Barbosa de, Dr. II. Rocha, Creso Santos da, Dr. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB)
IV. Titulo

CDU 621.3(043)

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA RESSONÂNCIA TRANSVERSA
MODIFICADA EM LINHAS DE MICROFITA MULTICAMADAS COM
SEGMENTAÇÃO VERTICAL**


STÊNIO FLÁVIO DE LACERDA FERNANDES

Dissertação Aprovada em 30.08.1996

PROF. MARCOS ANTONIO BARBOSA DE MELO, Dr., UFPB
Orientador


PROF. CRESO SANTOS DA ROCHA, Ph.D., UFPB
Orientador


PROF. ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., ETEPB
Componente da Banca


PROF. JOSÉ DE RIBAMAR SILVA OLIVEIRA, D.Sc., CEFET-MA
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Agosto - 1996

À minha família, com carinho.

À minha esposa Nina, pelo amor e apoio nas horas certas.

Aos meus filhos Victor e Alice, pois tudo isso foi por eles.

Agradecimentos

Aos diretores da Escola Técnica Federal de Alagoas - ETFAL, Alberto José Cavalcante e Mário César Jucá, pelo apoio e confiança.

Aos Professores da Coordenadoria de Eletrônica e Processamento de Dados da ETFAL, pelo incentivo.

Ao Prof. Alfredo Gomes Neto da ETEFPB, pela amizade, incentivo e estímulo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Profs. Creso Santos da Rocha e Marcos A. Barbosa de Melo, pela orientação durante o curso.

Ao Prof. José de Ribamar Silva Oliveira do CEFET-MA, pelas valiosas discussões.

Aos demais professores, funcionários e amigos da ETFAL, ETEFPB e UFPB.

Este trabalho teve apoio financeiro da CAPES e do CNPq.

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é estender o escopo de aplicação da Técnica da Ressonância Transversa Modificada - MTRT para as estruturas de linhas de microfita simétricas multicamadas segmentadas verticalmente. Para isto, uma análise teórica e numérica dos parâmetros destas estruturas é realizada, visando conhecer o seu comportamento dispersivo, através da determinação da constante dielétrica efetiva.

São consideradas para a análise teórica as linhas de microfita com múltiplas camadas nas regiões acima e abaixo da fita condutora e fora dela. Posteriormente, na análise numérica, são particularizados os casos da linha de microfita uniforme convencional, a linha de microfita com uma camada dielétrica superior, como superestrato, - "covered microstrip" -, dentre outras estruturas propostas. O efeito da largura finita do substrato dielétrico é observado.

São apresentados resultados numéricos para a constante dielétrica efetiva, ou derivações desta, e feitas comparações com outros resultados apresentados na literatura, tendo sido observadas boas concordâncias. São realizados testes de convergência do método buscando otimizar a relação entre tempo de processamento e precisão numérica.

Finalmente, são apresentadas algumas sugestões para a continuidade deste trabalho.

Abstract

The main aim of this work is to extend the Modified Transverse Resonance Technique - MTRT applications to the symmetric microstrip lines structures vertically multilayered. In order to do that, a theoretical and numerical analysis of the parameters of these structures is performed, aiming to determine the dispersion behavior through the knowledge about the effective dielectric constant.

To perform the theoretical analysis, multiple layers in the region around the metallic strip are considered. This structure is denominated generalized multilayer microstrip. Later, in numerical analysis, the generalized multilayer microstrip is particularized to the covered microstrip, as well to other similar structures. Also, the effect of substrate finite width on the effective permittivity is presented.

The numerical results for the effective dielectric constant are presented and compared with the results found in the literature. Excellent concordances have been observed. Convergence tests are realized in order to optimize the relation between the processing time and numerical precision.

Finally, suggestions for the continuity and improvement of this work are presented.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos e Formulação do Problema	1
1.2	Estruturas de Linhas de Microfitas: conceitos	5
1.3	Métodos de Análises das Linhas de Microfita	13
2	A Técnica da Ressonância Transversa Modificada	16
2.1	Formulação Genérica	17
2.2	Circuito Equivalente	18
2.3	Considerações Sobre a Matriz Admitância	21
3	Aplicação em Linhas de Microfita	24
3.1	Aplicação da MTRT em Linhas de Microfita	24
3.2	Determinação do Circuito Equivalente	24
3.3	Matriz Admitância Genérica	27
3.4	Solução das Equações de Campo	29
3.4.1	Análise das Regiões Não-Homogêneas	31
3.4.2	Análise das Regiões Homogêneas	43
3.5	Determinação dos Produtos Escalares	50

3.6	Cálculo do Operador Admitância na Descontinuidade	54
3.7	Estruturação do Programa	60
4	Resultados Numéricos	64
4.1	Resultados e Convergência	64
4.2	Linha de Microfita Uniforme	65
4.3	Linha de Microfita com Dielétrico de Largura Finita	68
4.4	Covered Microstrip e variações	72
5	Conclusão	83
5.1	Sugestões	84

Lista de Tabelas

1.1	Alguns dielétricos utilizados em substratos de linhas de microfita . . .	11
-----	--	----

Lista de Figuras

1.1	Estrutura genérica: 'n' camadas sob a fita e 'm' fora	2
1.2	Linha de microfita uniforme	3
1.3	Estrutura com dielétrico de largura finita	4
1.4	Covered microstrip	5
1.5	Covered microstrip-like lines	6
1.6	Covered microstrip-like lines	7
1.7	Estrutura com dielétricos distintos verticalmente	8
1.8	Configuração das linhas de campo elétrico e magnético numa linha de microfita aberta	10
1.9	Vários métodos de análise de linhas de microfitas	14
2.1	Estrutura exemplo	18
2.2	Circuito equivalente da estrutura exemplo	19
2.3	Circuito equivalente simplificado	20
3.1	Circuito equivalente da linha de microfita blindada genérica	25
3.2	Circuito simplificado da linha de microfita genérica	26
3.3	Definição das subregiões da estrutura	30
3.4	Simetria da estrutura	55

3.5	Estrutura com duas camadas abaixo da fita	56
3.6	Equivalente em linhas de transmissão	57
3.7	Generalização do equivalente em linhas de transmissão de múltiplas camadas dielétricas	59
3.8	Fluxograma simplificado da implementação computacional	61
4.1	Linha de microfita uniforme convencional. Ref [28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92	66
4.2	Linha de microfita uniforme convencional. Ref[29] : T.Itoh and R.Mittra - IEEE MTT - 73	67
4.3	Efeito da largura finita do substrato dielétrico. Ref[5]: A. Rong and S. Li - Eletronics Letters - 1990	69
4.4	Efeito da largura finita do substrato dielétrico. Ref[3]: Yang and Shafai - IEEE MTT - 94	70
4.5	Efeito da largura finita do substrato dielétrico. Ref[3]: Yang and Shafai - IEEE MTT - 94	71
4.6	Covered microstrip. Ref [8] : C.-N.Chang and J.-F.Cheng - IEE Proc. MAP - 94	73
4.7	Covered microstrip com dielétrico de largura finita. Ref[31]: A. Nyshadham and K.V.S. Rao - IEEE MTT - Jan 91	74
4.8	Estrutura proposta: covered microstrip-like lines	75
4.9	Estrutura proposta: covered microstrip-like lines	76
4.10	Estrutura proposta: covered microstrip-like lines	77
4.11	Estrutura proposta: covered microstrip-like lines	78
4.12	Testes de Convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92	79

4.13 Testes de Convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92	80
4.14 Testes de Convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92	81
4.15 Testes de convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92	82
5.1 Linha de microfita multicamada segmentada horizontalmente	85

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivos e Formulação do Problema

O objetivo desta dissertação é aplicar a Técnica da Ressonância Transversa Modificada - MTRT (Modified Transverse Resonance Technique)[1] às estruturas planares em microondas e ondas milimétricas e mais especificamente, às **linhas de microfita multicamadas com segmentação vertical**. A estrutura genérica, a qual será analisada teoricamente, é apresentada na figura 1.1.

A linha de microfita nesta figura apresenta-se, no substrato, com um bloco de camadas dielétricas distintas nas regiões imediatamente sob da fita condutora e fora dela. A mesma situação da subdivisão do substrato em camadas ocorre na região sobre da fita (superestrato), onde está representada por reticências. Desta maneira, manipulando-se o número de camadas (n nas regiões da fita e m nas regiões fora da fita) e o valor do permissividade relativa de cada uma delas, pode-se verificar a aplicabilidade da MTRT em diversas estruturas encontradas na literatura. A estrutura é considerada simétrica e os substratos dielétricos isotrópicos e sem perdas. Através desta generalização, pode-se particularizar para os casos da linha de microfita uniforme convencional e da "covered microstrip", além de avaliar o efeito da colocação de diferentes camadas dielétricas acima da fita e o efeito da largura finita do substrato dielétrico, dentre outros casos.

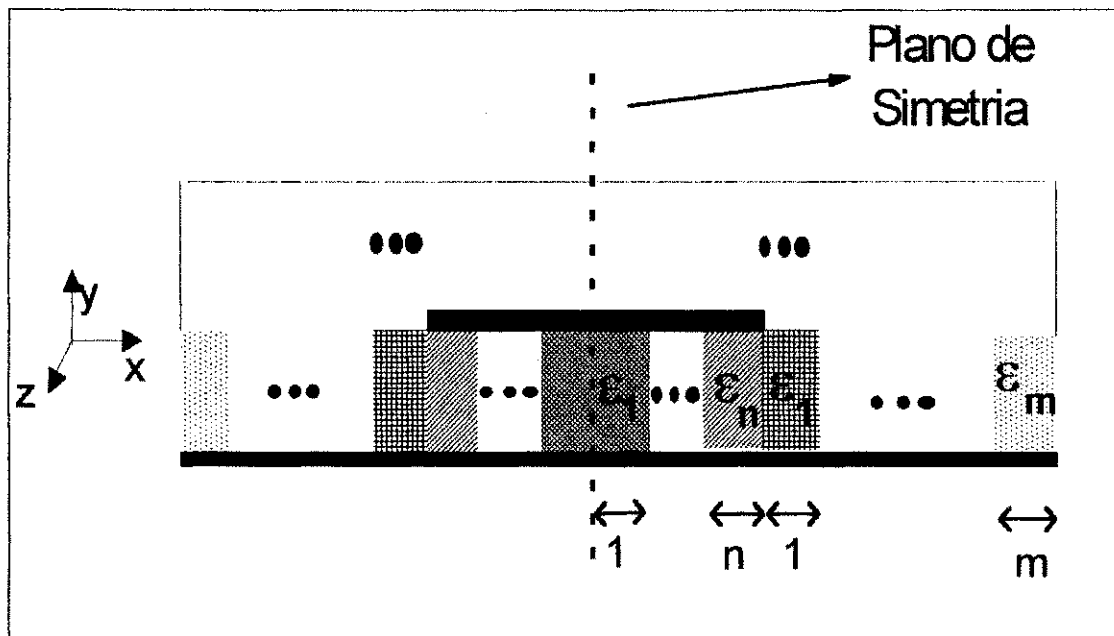


Figura 1.1: Estrutura genérica: 'n' camadas sob a fita e 'm' fora

Para efeito de validação da aplicação desta formulação, serão analisados numericamente os casos das linhas de microfita com distribuição de camadas dielétricas de acordo com as figuras 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, e 1.7.

A análise da linha de microfita uniforme (figura 1.2) é obtida considerando os valores das constantes dielétricas das diversas camadas, na região acima da fita, com $\epsilon_r = 1$. Na região sob a fita, são consideradas todas as camadas dielétricas iguais e de valor ϵ_r .

O efeito da largura finita do substrato dielétrico na constante dielétrica efetiva da estrutura, representada na figura 1.3, tem sido estudado utilizando-se vários métodos como o Método do Casamento Modal [2] [3], Método das Linhas [4] e o Método da Resonância Transversa combinado com o Método dos Momentos [5].

A influência de uma camada dielétrica adicional à linha de microfita uniforme, conforme a figura 1.4, também tem sido, recentemente, objeto de estudo através da Abordagem no Domínio Espectral [6] [7], de Mapeamento Conforme [8] e da Função de Green Generalizada no Domínio Espectral [9]. Neste caso, todas as camadas na

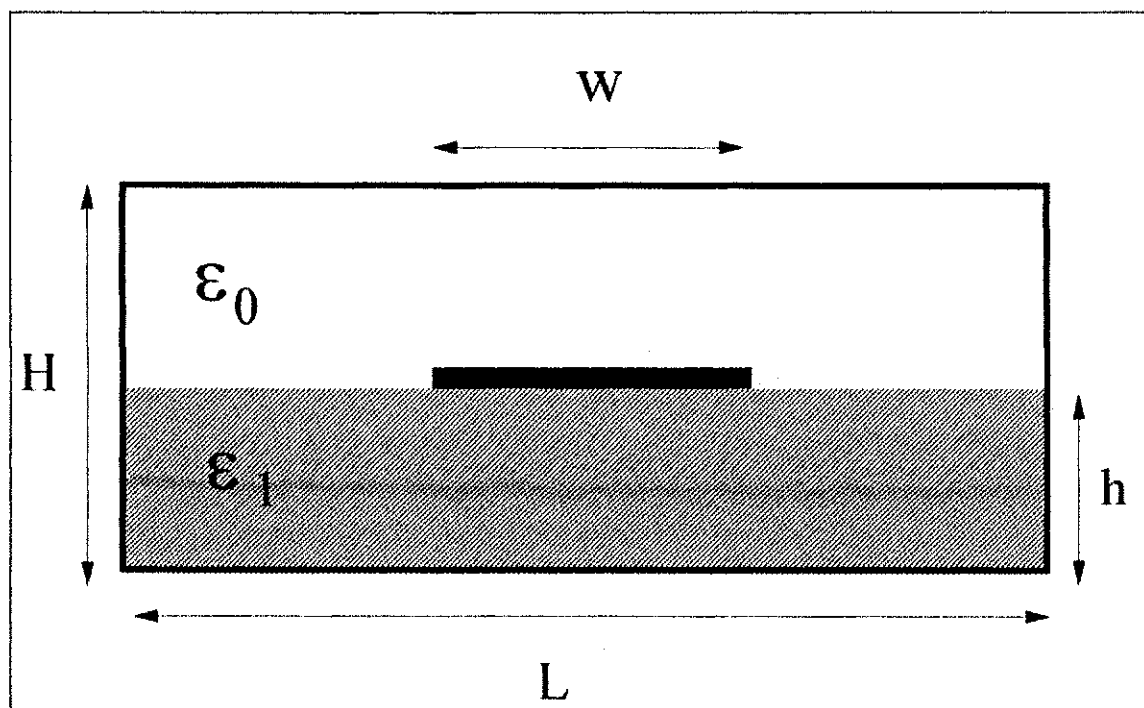


Figura 1.2: Linha de microfita uniforme

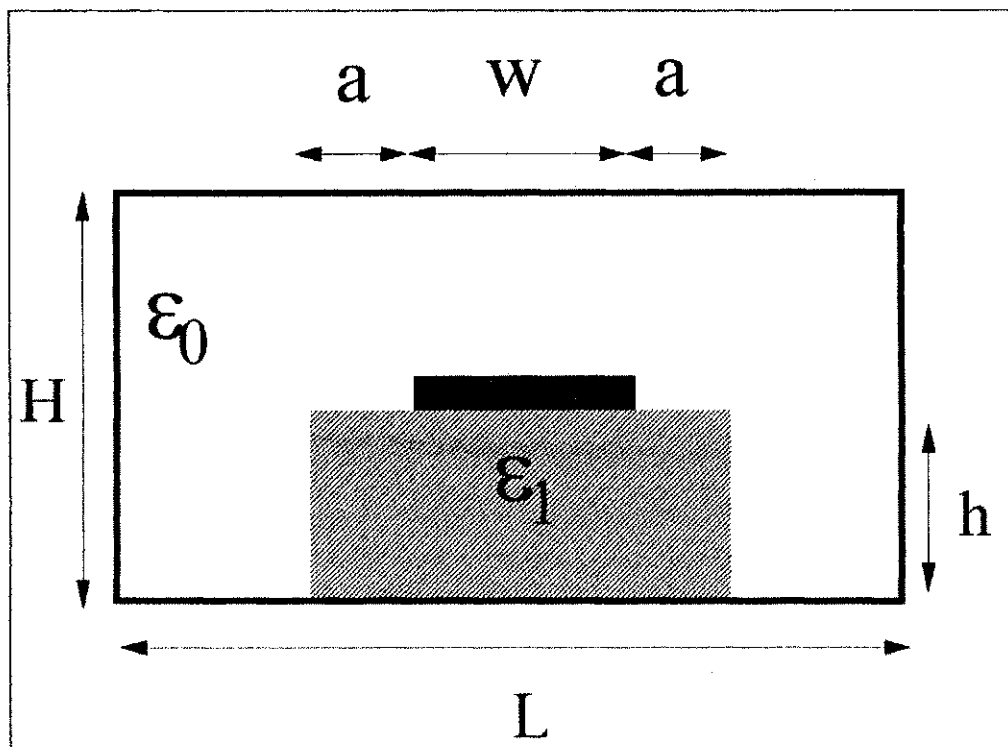


Figura 1.3: Estrutura com dielétrico de largura finita

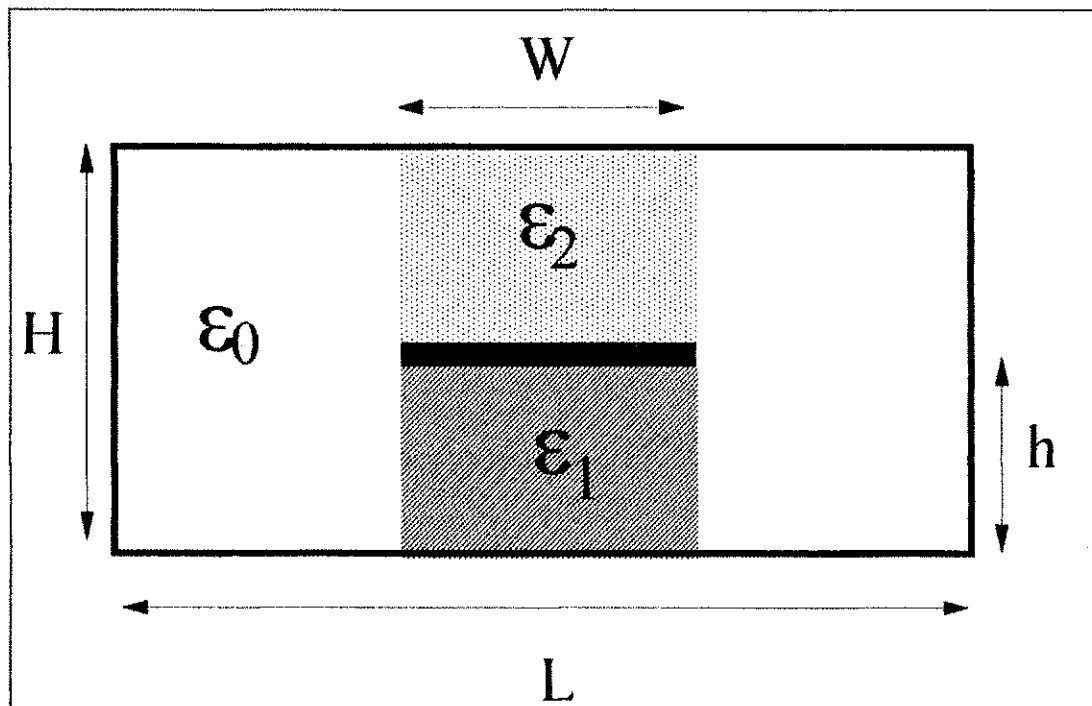


Figura 1.5: Covered microstrip-like lines

região acima da fita são consideradas com constantes dielétricas iguais, ϵ_{r2} . O mesmo procedimento é adotado para as camadas dielétricas abaixo da fita condutora, onde são consideradas com permissividade iguais e de valor ϵ_{r1} .

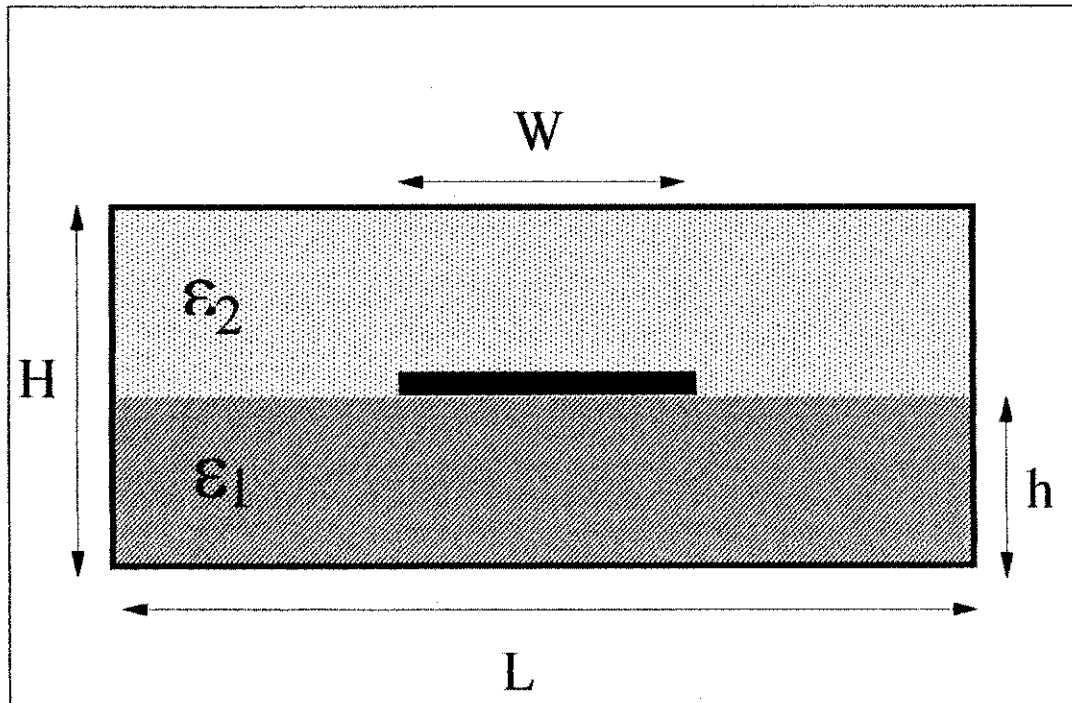


Figura 1.4: Covered microstrip

As estruturas mostradas nas figuras 1.5, 1.7, e 1.6 são extensões das covered microstrip, propostas para aplicação da MTRT, denominadas *covered microstrip-like lines*.

1.2 Estruturas de Linhas de Microfitas: conceitos

Os circuitos integrados em microondas (*MIC - Microwave Integrated Circuit*) consistem de dispositivos ativos e passivos formados ou depositados em um substrato dielétrico, podendo este ser também semicondutor. Os MICs podem se apresentar de duas formas:

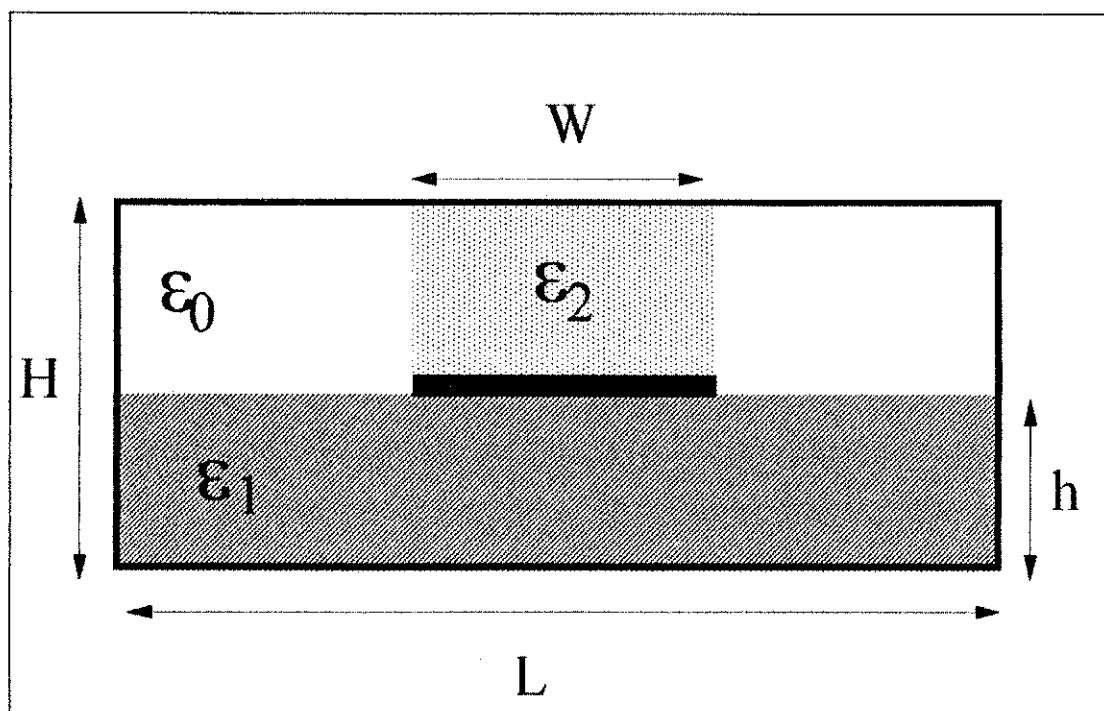


Figura 1.6: Covered microstrip-like lines

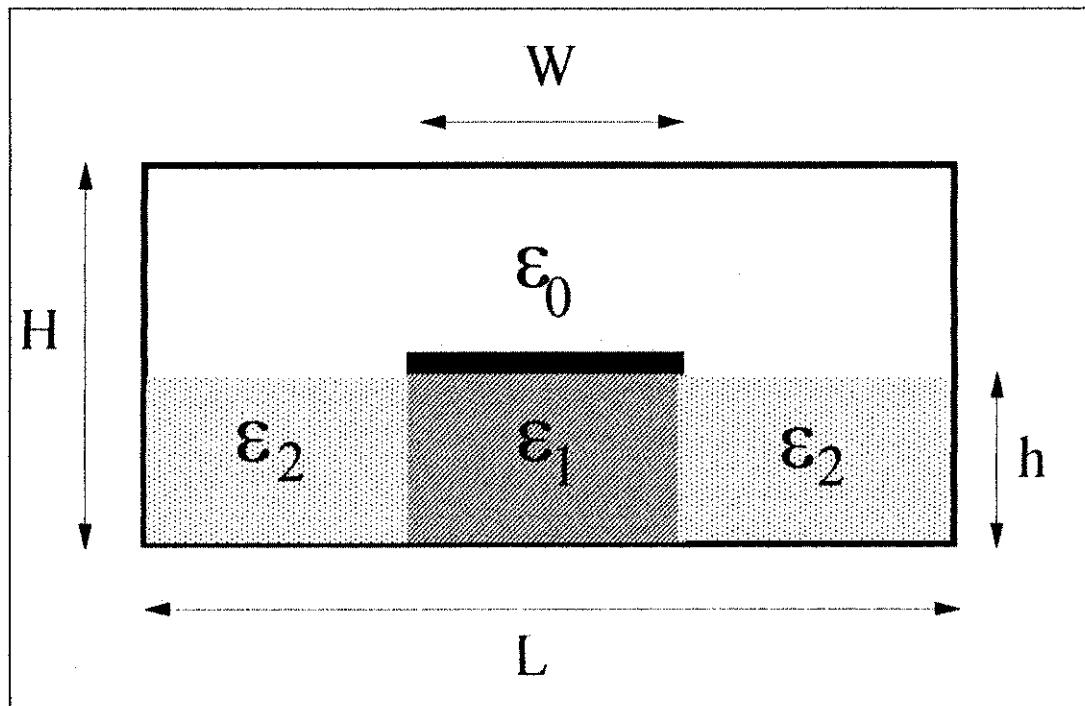


Figura 1.7: Estrutura com dielétricos distintos verticalmente

- a) circuitos integrados híbridos em microondas;
- b) circuitos integrados monolíticos em microondas (*MMIC* - *Monolithic Microwave Integrated Circuit*).

A interconexão dos diversos dispositivos são realizados por linhas de transmissão planares, onde as linhas de microfita são comumente utilizadas. Seeger [10] faz as seguintes considerações sobre as diferentes tecnologias:

Os circuitos integrados híbridos consistem de componentes ativos interconectados pelas linhas de transmissão planares em um substrato comum. As linhas de transmissão são fitas de condutores metálicos, normalmente cobre ou alumínio, depositados no substrato. Os processos litofotográficos, desenvolvidos originalmente para circuitos eletrônicos convencionais em baixas frequências, são simples e permitem desenvolvê-los para produção em série. Isto resulta em circuitos mais baratos, além de pequenos e leves, em comparação com sistemas que utilizam guias de ondas, entre outros similares.

Os circuitos integrados monolíticos são construídos em um único substrato semicondutor e as linhas de transmissão são construídas por deposição. O processo de fabricação é mais complexo.

Comparando as duas alternativas de fabricação de MICs, observa-se que os circuitos monolíticos oferecem maior possibilidade de redução em peso, dimensões e de implementação de circuitos mais complexos, com maior confiabilidade, sendo também mais vantajosos para aplicações em ondas milimétricas. Observa-se também que os circuitos híbridos, em geral, são mais fáceis de construção e de realização de ajustes pós-fabricação.

Normalmente, as linhas de microfita são abertas e, portanto, não-homogêneas, com os campos estendendo-se sobre o substrato dielétrico e o ar, conforme observa-se na figura 1.8. Em linhas de microfita largas ou em frequências mais elevadas, a maior parte do campo eletromagnético fica concentrada dentro do substrato dielétrico.

Este acoplamento indesejável pode ser evitado, em muitos casos, utilizando um substrato de permissividade dielétrica relativa de valor mais elevado, concentrando mais os campos dentro do dielétrico. O substrato dielétrico dá também o suporte

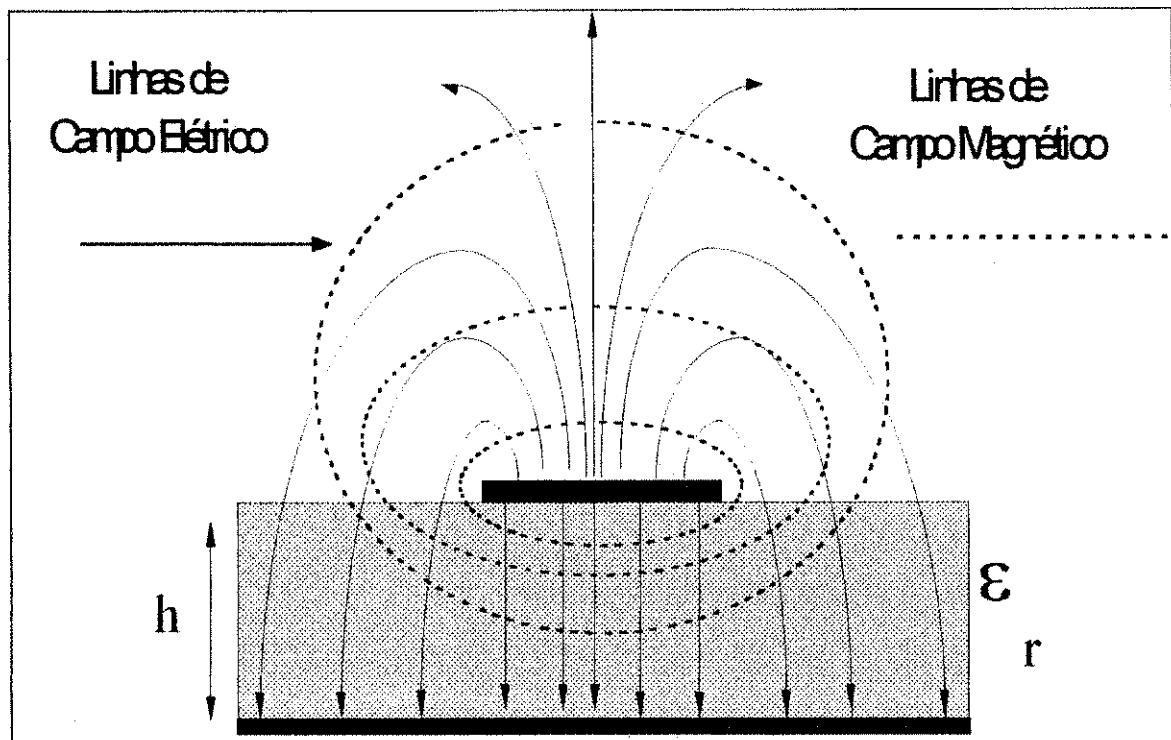


Figura 1.8: Configuração das linhas de campo elétrico e magnético numa linha de microfita aberta

Material	ϵ_r	$\tan \delta$ em 10GHz	Categoria
Alumina (Al_2O_3)	9.8	0.0001	Cerâmico
Safira	9.4	0.0001	Cerâmico
Arseneto de Gálio (GaAs)	12.9	0.002	Semicondutor
Silício	11.9	0.015	Semicondutor
Ferrite	9.0-16	0.001	Ferrimagnético
PTFE (Teflon)	2.1	0.0003	Sintético
RT/Duroid (Teflon + Fibra de Vidro)	2.33	0.0012	Sintético

Tabela 1.1: Alguns dielétricos utilizados em substratos de linhas de microfita

mecânico para a estrutura, ou seja, define suas características de rigidez. Eletricamente, os parâmetros que devem ser observados na escolha de um substrato dielétrico são a permissividade relativa, ϵ_r , a uniformidade; a permeabilidade magnética, μ_r , e as perdas dielétricas, δ .

Pode-se dividir os substratos dielétricos em quatro grupos, quais sejam: cerâmicos, sintéticos, semicondutores e ferrimagnéticos. A tabela 1.1 [11] lista os substratos mais comumente utilizados em estruturas planares, destacando a faixa de valores da permissividade dielétrica, categoria e tangente de perdas.

O procedimento mais comum na construção de protótipos de linhas de microfita é a preparação do *lay-out*, a avaliação teórica, incluindo as simulações computacionais, o processo litofotográfico e as medições em laboratório. Se o circuito projetado não tem as características adequadas, de acordo com o *lay-out* e projeto de aplicação, não apresentando boa concordância com os resultados obtidos por simulação, todo o procedimento deve ser refeito. Por isto, é de fundamental importância a etapa da análise teórica e simulação computacional, que devem ter um alto grau de precisão numérica.

Enfocando a distribuição dos campos eletromagnéticos, existem algumas características que se destacam:

i) os campos se propagam em regiões não-homogêneas (dielétrico-ar) e o modo de propagação não pode ser TEM puro, devido à existência das componentes de campo

elétrico e magnético na direção de propagação; o modo dominante é então conhecido como quasi-TEM;

ii) na prática, as estruturas tem dimensões finitas e podem ser fechadas, como na linha de microfita blindada. Devem ser observados os efeitos de blindagem, analisando-se principalmente as conseqüências das diferentes dimensões da altura, H , e da largura, L . Dependendo destas dimensões, ocorrerão variações na frequência de corte dos modos de ordem superior.

iii) sobre a propagação de modos na região não-homogênea, Edwards [12] considera "se a fita central é removida do guia, a estrutura reduz-se a um guia de onda com preenchimento parcial de dielétrico, que suporta modos LSE (Longitudinal Section Electric) e LSM (Longitudinal Section Magnetic)... Quando a fita condutora central é inserida, isto causa fluxos de corrente nas direções \hat{x} (transversa) e \hat{z} (longitudinal) na fita; estas correntes servem para acoplar os modos LSE e LSM, tal que a configuração modal final é híbrida. Com o aumento da frequência, a eficiência do acoplamento modal cresce e os campos ficam mais concentrados na região abaixo da fita."

Idealmente, após a validação teórica e das derivações numérico-computacionais, o procedimento experimental, construção e medição, comprovará a eficiência ou não do projeto.

Em termos de atenuação, as linhas de microfitas sofrem perdas devido a três fatores:

- i) perdas ôhmicas no condutor, resultante da condutividade finita do metal;
- ii) perdas no dielétrico, resultantes da dissipação de energia dentro do substrato, que é proporcional ao fator de tangente de perdas, δ ;
- iii) perdas por radiação, que normalmente ocorrem quando modos de ordem superior são excitados, em descontinuidades, por exemplo.

Os parâmetros dimensionais mais importantes das linhas de microfita são a largura da fita, W , e a espessura do substrato dielétrico, h . A relação entre estes parâmetros e a permissividade relativa do substrato dielétrico influencia diretamente na **permissividade dielétrica efetiva da estrutura**.

A constante dielétrica efetiva ou permissividade dielétrica efetiva da estrutura, ϵ_{eff} , pode ser interpretada como uma associação dos campos propagantes no substrato, de permissividade relativa, ϵ_r ; e no espaço livre, de permissividade ϵ_0 . Observa-se que para as linhas de microfita extremamente largas, $w \gg h$, praticamente todo o campo elétrico fica confinado no substrato e a estrutura comporta-se como um guia de placas paralelas. Os limites para ϵ_{eff} são estabelecidos da seguinte forma:

a) em baixas frequências, ϵ_{eff} reduz-se aproximadamente ao valor determinado por análise quasi-estática, ϵ_{eff0} ;

b) com o aumento da frequência, ϵ_{eff} aproxima-se da própria permissividade dielétrica do substrato, ϵ_r .

Estas informações são úteis para a entrada de dados utilizada na simulação computacional apresentada no capítulo 4.

1.3 Métodos de Análises das Linhas de Microfita

As técnicas numérico-computacionais utilizadas para caracterização das estruturas planares têm sido ponto de convergência nas pesquisas em microondas há várias décadas. Isto se deve à importância crescente dos circuitos integrados em microondas (MIC's e Monolithic MIC's) e também à dificuldade de ajustes após sua manufatura. Assim, métodos de caracterização precisa são necessários para a modelagem das estruturas. Suas características devem ser o alto grau de eficiência quanto ao uso do processador e um otimizado uso de memória. Em outras palavras, os métodos devem permitir uma implementação numérica precisa, aliada a um baixo tempo de processamento e necessidade de memória. Basicamente, a caracterização exige do pesquisador um processamento analítico e a implementação numérica citada. Assim, ao se estudar uma estrutura, deve-se escolher o método mais adequado, levando-se em consideração a dificuldade no processamento matemático e as ferramentas computacionais disponíveis. Itoh [13] faz um levantamento das técnicas numéricas para estruturas passivas em microondas e ondas milimétricas utilizadas mais comumente.

Gupta [14] subdivide os métodos de análise de microfita em três grupos, como mostra o organograma na figura 1.9.

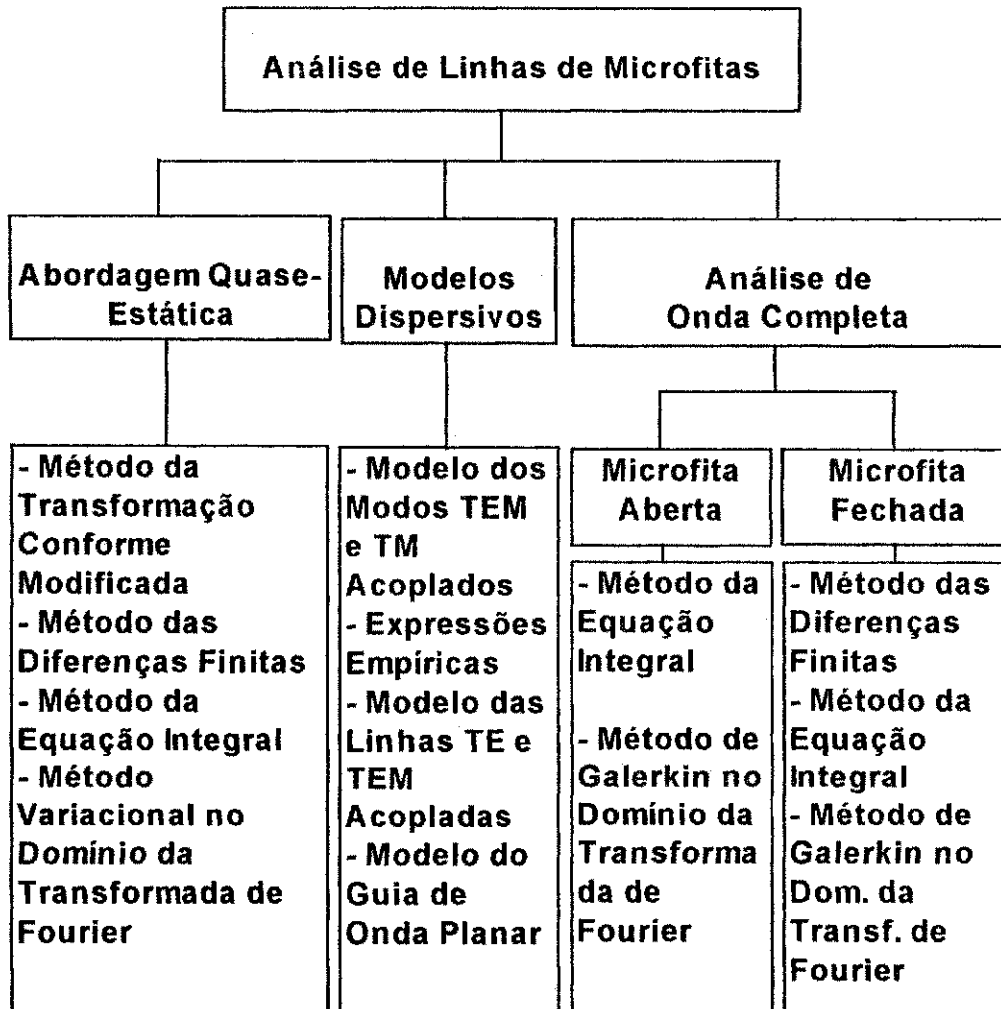


Figura 1.9: Vários métodos de análise de linhas de microfita

De acordo com Gupta, nos métodos considerados quasi-estáticos, o modo de propagação dominante é considerado TEM puro e as características da estrutura são desenvolvidas a partir das capacitâncias eletrostáticas. Suas análises restringem-se a faixas de frequências abaixo da banda X (de 8.2 a 12.4 GHz).

No grupo dos modelos dispersivos, a natureza não-TEM do modo dominante da microfita é agora considerado. Desta forma, a constante dielétrica efetiva e a impedância característica tornam-se função da frequência.

Na análise de onda completa, é introduzida a variação temporal dos campos elétricos e magnéticos e resolvida a equação de onda. Assim, nestes métodos, o parâmetro mais importante a ser determinado é a constante de propagação ao invés das capacitâncias eletrostáticas, obtidas nos modelos quasi-estáticos.

Capítulo 2

A Técnica da Ressonância Transversa Modificada

De acordo com Sorrentino [15], "*a Técnica da Ressonância Transversa (Transverse Resonance Technique - TRT), originou-se como uma aplicação do formalismo dos circuitos de microondas na direção perpendicular ao fluxo de potência em guias cilíndricos*". Tem-se aplicado a TRT na avaliação das características dispersivas para o modo dominante e os de ordem superior de guias homogêneos e não-homogêneos, incluindo estruturas guiantes com descontinuidades.

Um procedimento adotado na TRT é a determinação de um circuito equivalente da estrutura em estudo, que é utilizado na computação das frequências de corte e outras características. A técnica pode ser aplicada a estruturas onde todas as descontinuidades são ortogonais à mesma coordenada transversa ([16], [17] e [18]) e sua aplicação não se restringe apenas às geometrias retangulares.

Uma importante característica desta técnica é a forte dependência com a geometria da estrutura, ou seja, o desenvolvimento analítico é realizado diferentemente para cada estrutura. Com isto, torna-se inviável a aplicação em estruturas arbitrárias, onde métodos com intenso processamento numérico e pouco processamento analítico são mais adequados, como o método das diferenças finitas.

Usualmente, a solução das equações de Maxwell em guias homogêneos e uniformes

é obtida separando as dependências longitudinal e transversal das componentes de campo. Isto leva à decomposição da solução geral em modos TE e TM em relação à direção axial. Assim, diferentes escolhas de qual é a direção axial ou a direção de propagação, leva a diferentes conjuntos modais.

Recentemente, foi proposta uma formulação alternativa para a TRT, a Técnica da Ressonância Transversa Modificada (Modified Transverse Resonance Technique - MTRT) [1] onde a diferença principal em relação à técnica original, está na determinação do circuito equivalente da estrutura, e, conseqüentemente, nas outras formulações.

A técnica utilizada nesta dissertação é a MTRT que será descrita nos capítulos e seções seguintes.

2.1 Formulação Genérica

O Método da Ressonância Transversa Modificada - MTRT consiste inicialmente, na determinação do circuito equivalente da estrutura em análise. Gomes Neto [1], apresenta algumas regras básicas para a determinação deste circuito equivalente que, conforme comentado anteriormente, depende da geometria da estrutura. Considerando uma estrutura exemplo mostrada na figura 2.1, que é considerada infinita no eixo \hat{z} , o circuito equivalente é obtido obedecendo as seguintes regras:

1) a região entre duas **interfaces** é representada por linhas de transmissão associadas, cada uma, aos modos de propagação. Esses modos podem ser propagativos, evanescentes ou complexos. O termo interface refere-se ao plano perpendicular ao sentido de propagação, o qual delimita dois meios diferentes.

2) as linhas de transmissão terminais são conectadas à admitâncias, que dependendo das condições de fechamento da estrutura (característica das paredes laterais e, se for simétrica, do plano de simetria), podem ser infinitas, nulas ou a própria admitância característica da linha.

3) um circuito genérico (ou uma fonte de tensão genérica, na notação simplificada)

é inserido na interface onde ocorre uma descontinuidade; uma notação simplificada será utilizada.

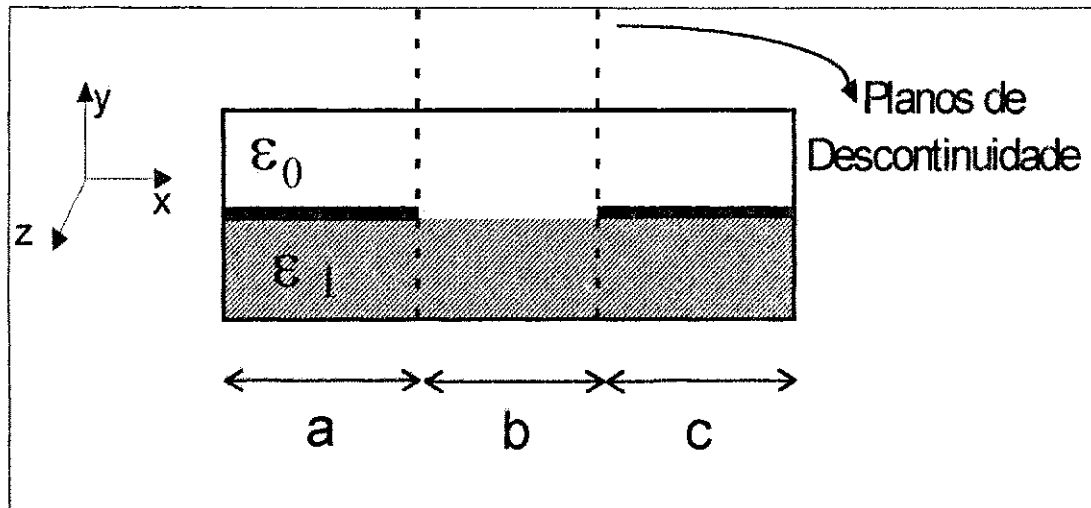


Figura 2.1: Estrutura exemplo

2.2 Circuito Equivalente

O circuito equivalente obtido pela MRTT, que considera uma propagação fictícia segundo o eixo \hat{x} , é mostrado na figura 2.2:

Para efeito de simplificação da notação original de Sorrentino [17], Gomes Neto [1] utiliza uma simbologia mais compacta proposta por Baudrand [19]. Nesta notação, as infinitas linhas de transmissão são unificadas e os circuitos genéricos que representam as descontinuidades são associados a uma fonte de tensão variável.

Com isto o circuito equivalente toma a representação da figura 2.3:

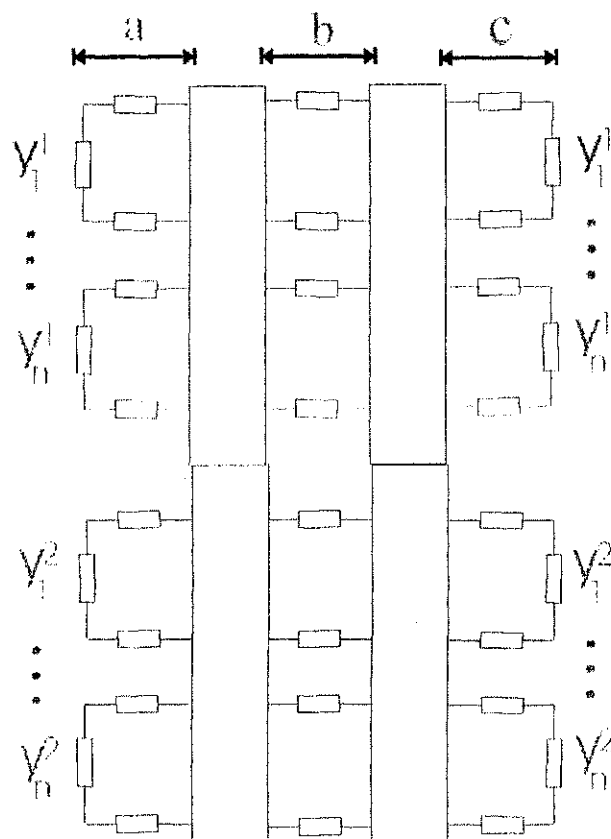


Figura 2.2: Circuito equivalente da estrutura exemplo

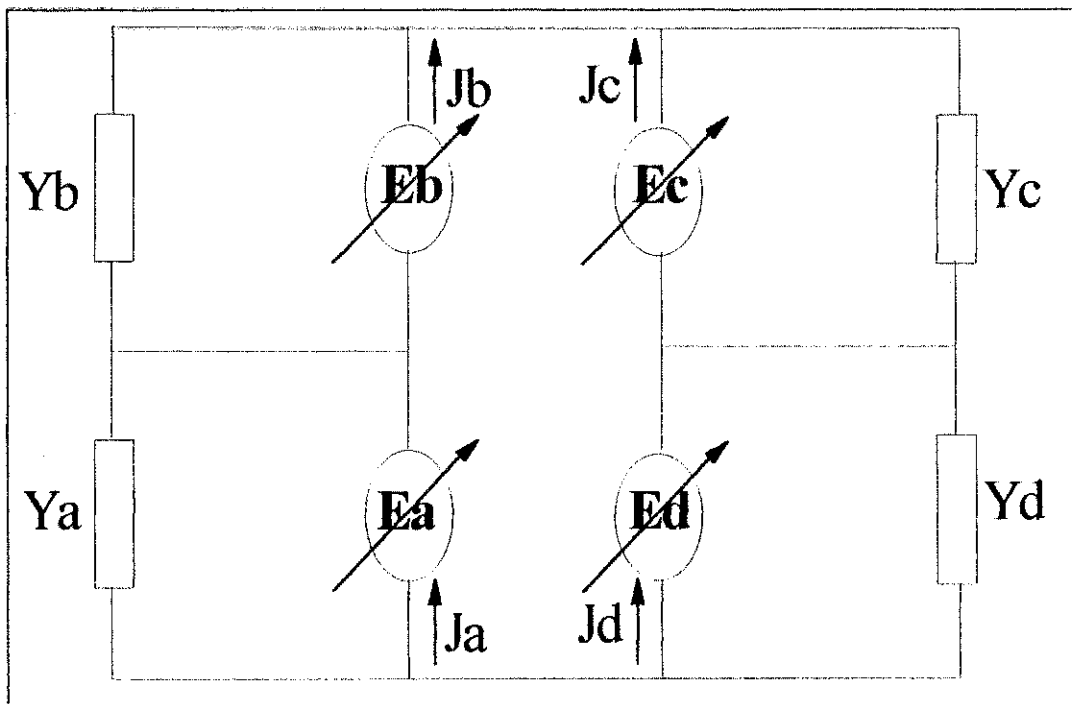


Figura 2.3: Circuito equivalente simplificado

2.3 Considerações Sobre a Matriz Admitância

Para expressar a densidade de corrente em função do campo elétrico, utiliza-se, em notação matricial, a expressão 2.1:

$$[J] = [Y][E] \quad (2.1)$$

onde:

$[J]$ - vetor densidade de corrente;

$[Y]$ - matriz admitância;

$[E]$ - vetor campo elétrico.

Assim, considerando o circuito equivalente simplificado apresentado anteriormente na seção 2.2, e utilizando a análise convencional de circuitos de baixa frequência, como por exemplo a análise de malhas, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \\ J_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_a & & & \\ & Y_b & & \\ & & Y_c & \\ & & & Y_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \\ E_d \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Pela formulação da MTRT, as admitâncias e os campos elétrico e magnético, têm que ser descritos nos planos de descontinuidades. Primeiramente, descrever-se-á as admitâncias na descontinuidade, utilizando para isso, o conceito de operador admitância, \hat{Y} , definido por:

$$\hat{Y} = \sum_n |\bar{J}_n\rangle Y_n \langle \bar{J}_n| \quad (2.3)$$

onde,

$|\bar{J}_n\rangle$ - vetor de funções de base, dado por:

$$|\bar{J}_n\rangle = \begin{bmatrix} |\bar{J}_n^y\rangle \\ |\bar{J}_n^z\rangle \end{bmatrix}$$

$|\bar{J}_n\rangle$ - vetor de funções de base, descrito da seguinte forma:

$$\langle \bar{J}_n | = \left[\langle \bar{J}_n^y | \langle \bar{J}_n^z | \right]$$

Observe-se que o índice $n = a, b, c, d, \dots$ indica o número de descontinuidades e os índices y e z referem-se aos vetores unitários dos planos de descontinuidades, visto que a propagação é considerada em \hat{x} . Outrossim, o termo Y_n refere-se à admitância deslocada para o plano de descontinuidade. Assim, expande-se a equação 2.3 em 2.4:

$$\hat{Y} = \sum_n \begin{bmatrix} |\bar{J}_n^y\rangle Y_n \langle \bar{J}_n^y | & |\bar{J}_n^y\rangle Y_n \langle \bar{J}_n^z | \\ |\bar{J}_n^z\rangle Y_n \langle \bar{J}_n^y | & |\bar{J}_n^z\rangle Y_n \langle \bar{J}_n^z | \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Na descrição dos campos elétricos sobre o plano de descontinuidade, será aplicado o Método dos Momentos [20], [21]. Toma-se como característica das funções de teste, a sua coerência com as condições de contorno no plano yz , na descontinuidade. Definindo as funções de teste como Φ_y e Φ_z , para os eixos \hat{y} e \hat{z} , respectivamente, o produto $[Y][E]$ pode ser descrito sobre elas, por:

$$[Y][E] = \sum_n \begin{bmatrix} \Phi_{y,1} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \Phi_{y,i} & 0 \\ 0 & \Phi_{z,1} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \Phi_{z,j} \end{bmatrix} [\hat{Y}] \begin{bmatrix} \Phi_{y,1} & \dots & \Phi_{y,i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \Phi_{z,1} & \dots & \Phi_{z,j} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

onde:

i - número de funções de teste no eixo \hat{y} ;

j - número de funções de teste no eixo \hat{z} ;

Assim,

$$[Y][E] = \sum_n \begin{bmatrix} \Phi_{y,1} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \Phi_{y,i} & 0 \\ 0 & \Phi_{z,1} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \Phi_{z,j} \end{bmatrix}_{(i+j) \times 2} \quad (2.6)$$

$$\times \begin{bmatrix} |\bar{f}_n^y\rangle Y_n \langle \bar{f}_n^y| & |\bar{f}_n^y\rangle Y_n \langle \bar{f}_n^z| \\ |\bar{f}_n^z\rangle Y_n \langle \bar{f}_n^y| & |\bar{f}_n^z\rangle Y_n \langle \bar{f}_n^z| \end{bmatrix}_{(2 \times 2)} \quad (2.7)$$

$$\times \begin{bmatrix} \Phi_{y,1} & \cdots & \Phi_{y,i} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \Phi_{z,1} & \cdots & \Phi_{z,j} \end{bmatrix}_{2 \times (i+j)} \quad (2.8)$$

Realizando a multiplicação das matrizes, observa-se que a dimensão da matriz admitância final é $(i + j) \times (i + j)$, ou seja, a ordem da matriz é a soma do número de funções de teste em cada eixo, y e z .

A condição de ressonância é verificada quando, para um determinado valor da constante de propagação γ_z , numa frequência específica, o determinante da matriz admitância Y é nulo. O procedimento numérico para obter a condição de ressonância é mostrado na seção 3.7.

Capítulo 3

Aplicação em Linhas de Microfita

3.1 Aplicação da MTRT em Linhas de Microfita

Na aplicação da MTRT em estruturas planares, far-se-á o estudo das *linhas de microfita multicamadas com segmentação vertical*. Será considerada genericamente uma linha de microfita simétrica blindada, com n camadas dielétricas na região sob a fita condutora e m na região fora da fita, conforme a figura 1.1. Observe-se que a segmentação é também considerada na região acima da fita.

3.2 Determinação do Circuito Equivalente

De acordo com a formulação teórica apresentada no capítulo 2, o circuito equivalente da estrutura da figura 1.1, considerando-se a simetria da estrutura, é apresentado na figura 3.1:

Utilizando o modelo simplificado, obtém-se o circuito da figura 3.2:

Aplicando uma trivial análise de circuitos, por exemplo, análise de malhas, obter-se-á a matriz admitância do circuito.

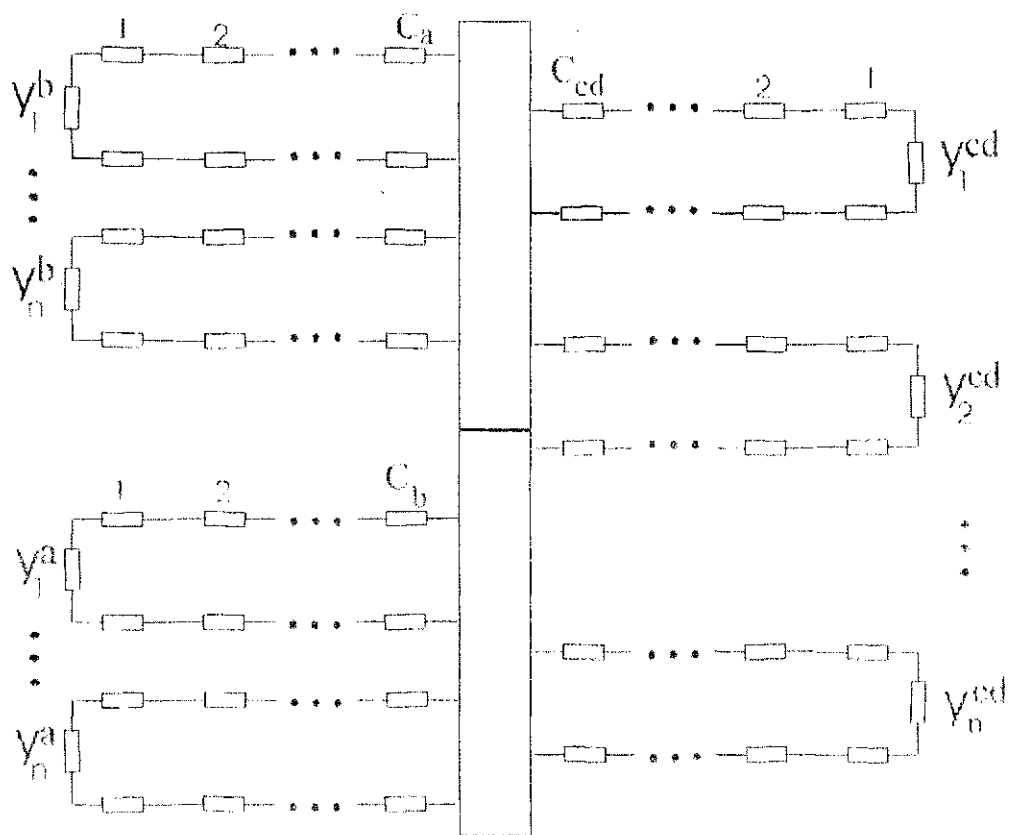


Figura 3.1: Circuito equivalente da linha de microfita blindada genérica

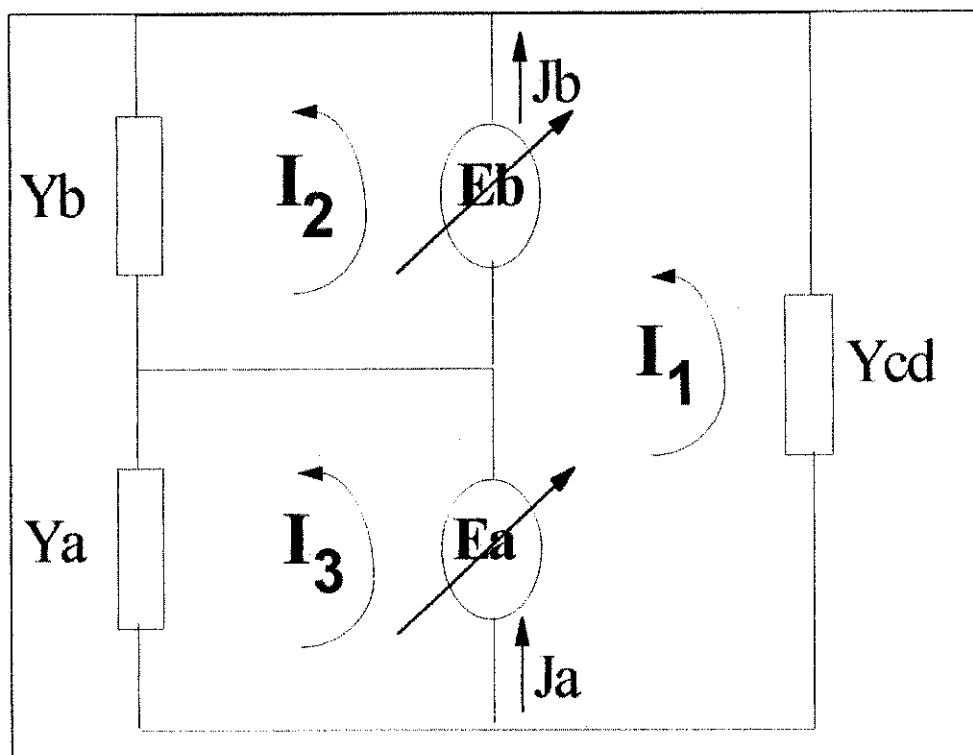


Figura 3.2: Circuito simplificado da linha de microfita genérica

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{cd} & Y_{cd} + Y_b & Y_{cd} + Y_a \\ Y_{cd} + Y_b & Y_b & Y_a + Y_b \\ Y_{cd} + Y_a & Y_a + Y_b & Y_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a + E_b \\ -E_b \\ -E_a \end{bmatrix}$$

Desenvolvendo cada corrente de malha I_n , deduz-se as correntes J_n , por:

$$J_a = I_1 - I_3 = E_a [Y_{cd} + Y_a] + E_b [Y_{cd}]$$

$$J_b = I_1 - I_2 = E_a [Y_a] + E_b [Y_{cd} + Y_b]$$

Em notação matricial:

$$\begin{bmatrix} [J_a] \\ [J_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_a] + [Y_{cd}] & [Y_{cd}] \\ [Y_{cd}] & [Y_b] + [Y_{cd}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [E_a] \\ [E_b] \end{bmatrix}$$

3.3 Matriz Admitância Genérica

Como descrito no capítulo 2, seção 2.3, o produto $[Y][E]$ é, neste caso, representado por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [J_a] \\ [J_b] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [\phi_a] & [0] \\ [0] & [\phi_b] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Y_a] + [Y_{cd}] & [Y_{cd}] \\ [Y_{cd}] & [Y_b] + [Y_{cd}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\phi_a] & [0] \\ [0] & [\phi_b] \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \begin{bmatrix} [J_a] \\ [J_b] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [\phi_a] [[Y_a] + [Y_{cd}]] [\phi_a] & [\phi_a] [Y_{cd}] [\phi_b] \\ [\phi_b] [Y_{cd}] [\phi_a] & [\phi_b] [[Y_b] + [Y_{cd}]] [\phi_b] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde:

$$[\phi_a] = \begin{bmatrix} \phi_{a,1}^y & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \phi_{a,i}^y & 0 \\ 0 & \phi_{a,1}^z \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \phi_{a,j}^z \end{bmatrix}_{(i+j) \times 2}$$

$$[\phi_b] = \begin{bmatrix} \phi_{b,1}^y & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \phi_{b,i}^y & 0 \\ 0 & \phi_{b,1}^z \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \phi_{b,j}^z \end{bmatrix}_{(i+j) \times 2}$$

i = número de funções de teste no eixo \hat{y} ;

j = número de funções de teste no eixo \hat{z} .

Utilizando o conceito de operador admitância, obtém-se a expansão das sub-matrizes admitâncias em termos das funções de base:

$$[Y_a] + [Y_{cd}] = \begin{bmatrix} | f_a^y \rangle Y_a \langle f_a^y | + | f_{cd}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^y | & | f_a^y \rangle Y_a \langle f_a^z | + | f_{cd}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^z | \\ | f_a^z \rangle Y_a \langle f_a^y | + | f_{cd}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^y | & | f_a^z \rangle Y_a \langle f_a^z | + | f_{cd}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^z | \end{bmatrix}_{(2 \times 2)} \quad (3.2)$$

$$[Y_b] + [Y_{cd}] = \begin{bmatrix} | f_b^y \rangle Y_b \langle f_b^y | + | f_{cd}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^y | & | f_b^y \rangle Y_b \langle f_b^z | + | f_{cd}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^z | \\ | f_b^z \rangle Y_b \langle f_b^y | + | f_{cd}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^y | & | f_b^z \rangle Y_b \langle f_b^z | + | f_{cd}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^z | \end{bmatrix}_{(2 \times 2)} \quad (3.3)$$

$$[Y_{cd}] = \begin{bmatrix} | f_{cd}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^y | & | f_{cd}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^z | \\ | f_{cd}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^y | & | f_{cd}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd}^z | \end{bmatrix}_{(2 \times 2)} \quad (3.4)$$

Desenvolvendo cada termo da matriz final (3.1), tem-se:

$$\begin{aligned} & [\phi_{a(b)}] \left[[Y_{a(b)}] + [Y_{cd}] \right] [\phi_{a(b)}] \\ &= \sum_n \begin{bmatrix} \langle \phi_{a(b),1}^y | f_{a(b),n}^y \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^y | \phi_{a(b),1}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),1}^y | f_{a(b),n}^y \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^z | \phi_{a(b),1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{a(b),i}^y | f_{a(b),n}^y \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^y | \phi_{a(b),i}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),i}^y | f_{a(b),n}^y \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^z | \phi_{a(b),i}^z \rangle \\ \langle \phi_{a(b),1}^z | f_{a(b),n}^z \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^y | \phi_{a(b),1}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),1}^z | f_{a(b),n}^z \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^z | \phi_{a(b),1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{a(b),i}^z | f_{a(b),n}^z \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^y | \phi_{a(b),i}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),i}^z | f_{a(b),n}^z \rangle Y_{a(b)} \langle f_{a(b),n}^z | \phi_{a(b),i}^z \rangle \end{bmatrix} + \end{aligned}$$

$$\sum_n \begin{bmatrix} \langle \phi_{a(b),1}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a(b),1}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),1}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a(b),1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{a(b),i}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a(b),i}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),i}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a(b),i}^z \rangle \\ \langle \phi_{a(b),1}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a(b),1}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),1}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a(b),1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{a(b),i}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a(b),i}^y \rangle & \langle \phi_{a(b),i}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a(b),i}^z \rangle \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$[\phi_a] [Y_{cd}] [\phi_b] = \sum_n \begin{bmatrix} \langle \phi_{a,1}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{b,1}^y \rangle & \langle \phi_{a,1}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{b,1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{a,i}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{b,i}^y \rangle & \langle \phi_{a,i}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{b,i}^z \rangle \\ \langle \phi_{a,1}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{b,1}^y \rangle & \langle \phi_{a,1}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{b,1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{a,i}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{b,i}^y \rangle & \langle \phi_{a,i}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{b,i}^z \rangle \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[\phi_b] [Y_{cd}] [\phi_a] = \sum_n \begin{bmatrix} \langle \phi_{b,1}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a,1}^y \rangle & \langle \phi_{b,1}^z | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a,1}^y \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{b,i}^y | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a,i}^y \rangle & \langle \phi_{b,i}^z | f_{cd,n}^y \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a,i}^y \rangle \\ \langle \phi_{b,1}^y | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a,1}^y \rangle & \langle \phi_{b,1}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a,1}^z \rangle \\ \vdots & \vdots \\ \langle \phi_{b,i}^y | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^y | \phi_{a,i}^y \rangle & \langle \phi_{b,i}^z | f_{cd,n}^z \rangle Y_{cd} \langle f_{cd,n}^z | \phi_{a,i}^z \rangle \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.4 Solução das Equações de Campo

Na solução das equações de campo, serão obtidos os campos elétrico e magnético nas sub-regiões a, b, c e d de acordo com a figura 3.3. Nesta estrutura são consideradas a simetria e múltiplas camadas dielétricas segmentadas verticalmente.

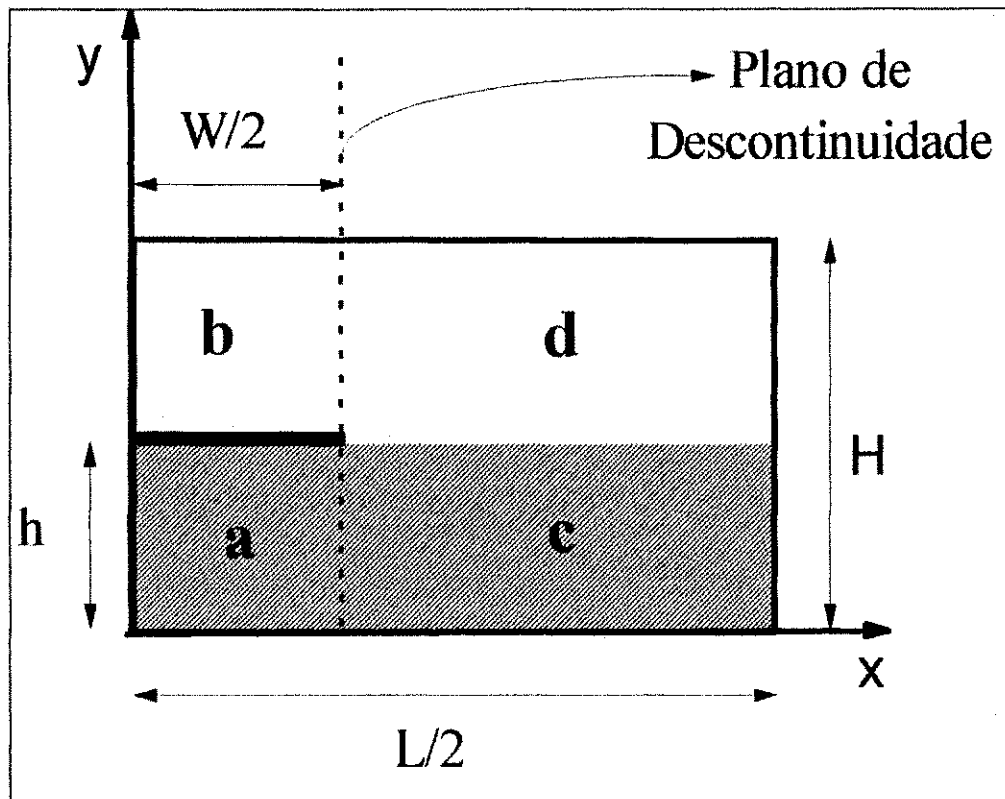


Figura 3.3: Definição das subregiões da estrutura

3.4.1 Análise das Regiões Não-Homogêneas

Como já citado anteriormente, na aplicação da MTRT, é considerada a propagação de uma onda eletromagnética fictícia segundo o eixo \hat{x} . Assim, considere-se inicialmente, as seguintes expressões genéricas para os campos elétricos e magnéticos:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}(y) e^{-\gamma_x x} e^{-\gamma_z z} = \vec{E}(y) e^{-\Gamma} \\ \vec{H} &= \vec{H}(y) e^{-\gamma_x x} e^{-\gamma_z z} = \vec{H}(y) e^{-\Gamma},\end{aligned}$$

onde

$$\Gamma = \gamma_x x + \gamma_z z \text{ e}$$

$\gamma_{x(z)}$ - é a constante de propagação segundo o eixo $\hat{x}(\hat{z})$.

Soluções para os modos LSE

Utilizando as equações de Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$ e $\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$, e considerando que, para esses modos, $\vec{E}_y(y) = 0$, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} = j\omega\mu H_z \end{bmatrix} \implies$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu H_x \quad (3.8)$$

$$-\gamma_x E_z + \gamma_z E_x = j\omega\mu H_y \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = j\omega\mu H_z \quad (3.10)$$

Partindo da outra equação de Maxwell, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon \vec{E} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \partial & \partial & \partial \\ \partial x & \partial y & \partial z \\ H_x & H_y & H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega\epsilon E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \end{bmatrix} \implies$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma_z H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (3.11)$$

$$-\gamma_x H_z + \gamma_z H_x = 0 \quad (3.12)$$

$$-\gamma_x H_y - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (3.13)$$

Região c:

Analisando-se as condições de contorno da **região c**, observa-se que em $y = 0$, $E_z(y) = 0$. Assim, uma solução para E_z pode ser do tipo:

$$E_z^{c,e}(y) = A_e \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.14)$$

onde:

os índices e - referem-se aos campos para os modos LSE e c - refere-se à subregião c ;

A_e - amplitude do campo para os modos LSE;

ξ_c - constante de propagação da região c , segundo o eixo \hat{y} .

Da equação 3.8, tem-se:

$$\xi_c A_e \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} = -j\omega\mu H_x(y) \implies$$

$$H_x^{c,e}(y) = -\left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu}\right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.15)$$

Aplicando a equação 3.15 na 3.12, obtem-se:

$$H_z^{c,e}(y) = \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) H_x^{c,e}(y) \implies$$

$$H_z^{c,e}(y) = -\left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu}\right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.16)$$

Da equação 3.10, tem-se:

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu \left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu}\right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \implies$$

$$E_x^{c,e}(y) = \int_0^h -j\omega\mu \left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu}\right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} dy$$

$$E_x^{c,e}(y) = -\left(\frac{A_e \gamma_z}{\gamma_x}\right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.17)$$

Partindo da equação 3.13, tem-se:

$$-\gamma_x H_y = j\omega\epsilon E_z + \frac{\partial H_x}{\partial y} \implies$$

$$H_y^{c,e}(y) = \left(\frac{A_e \xi_c^2}{j\omega\mu\gamma_x}\right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} - \frac{j\omega\epsilon A_e}{\gamma_x} \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \implies$$

$$H_y^{c,e}(y) = A_e \left(\frac{(\xi_c^2 + \omega^2 \mu\epsilon)}{j\omega\mu\gamma_x}\right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.18)$$

Analogamente, aplicar-se-á as equações de Maxwell para determinação das equações de campo na região d da figura 3.3. Observando as condições de contorno na região, tem-se que em $y = H$, $E_z(y) = 0$. Assim, pode-se escrever uma solução para E_z do tipo:

$$E_z^{d,e}(y) = B_e \sinh(\xi_d(H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.19)$$

onde:

o índice d - refere-se à subregião d ;

B_e - amplitude do campo para os modos LSE;

ξ_d - constante de propagação da região d , segundo o eixo \hat{y} .

Considerando o mesmo procedimento utilizado para a obtenção das equações de campo na região c, obtém-se as seguintes componentes de campo:

$$H_x^{d,e}(y) = - \left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu} \right) \cosh(\xi_d(H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.20)$$

$$H_y^{d,e}(y) = \left(\frac{B_e (\xi_d^2 + \omega^2 \mu \epsilon)}{j\omega\mu\gamma_x} \right) \sinh(\xi_d(H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.21)$$

$$H_z^{d,e}(y) = - \left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_d(H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.22)$$

$$E_x^{d,e}(y) = - \left(\frac{B_e \gamma_z}{\gamma_x} \right) \sinh(\xi_d(H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.23)$$

Para o cálculo do vetores densidade de corrente, \vec{J} , aplica-se a equação abaixo em cada região:

$$\vec{J} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \vec{H} \times (-\hat{u}_x)$$

$$\vec{J} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ H_x & H_y & H_z \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} J_x &= 0 \\ J_y &= -\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H_z \\ J_z &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H_y \end{aligned}$$

Para a região c, as equações para as densidades de corrente ficam:

$$J_x^{c,e}(y) = 0 \quad (3.24)$$

$$J_y^{c,e}(y) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.25)$$

$$J_z^{c,e}(y) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{A_e (\xi_c^2 + \omega^2 \mu \varepsilon)}{j\omega\mu\gamma_x} \right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.26)$$

Aplicando agora para a região d, tem-se:

$$J_x^{d,e}(y) = 0 \quad (3.27)$$

$$J_y^{d,e}(y) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.28)$$

$$J_z^{d,e}(y) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{B_e (\xi_d^2 + \omega^2 \mu \varepsilon)}{j\omega\mu\gamma_x} \right) \sinh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.29)$$

Após determinadas as equações de campo e densidades de corrente para as regiões c e d, aplicar-se-ão as condições de continuidade para relacionarmos as constantes de amplitudes envolvidas A_e , B_e , ξ_c e ξ_d .

No plano que delimita os dielétricos abaixo e acima da fita ($y = h$) na figura 3.3, sabe-se que os campos tangenciais, ou seja, os campos nas direções \hat{x} e \hat{z} , são iguais.

Assim:

$$E_x^{c,e}(y)|_h = E_x^{d,e}(y)|_h \quad (3.30)$$

$$E_z^{c,e}(y)|_h = E_z^{d,e}(y)|_h \quad (3.31)$$

$$H_x^{c,e}(y)|_h = H_x^{d,e}(y)|_h \quad (3.32)$$

$$H_z^{c,e}(y)|_h = H_z^{d,e}(y)|_h \quad (3.33)$$

Pela equação 3.30:

$$-\left(\frac{A_e \gamma_z}{\gamma_x}\right) \sinh(\xi_c h) e^{-\Gamma} = -\left(\frac{B_e \gamma_z}{\gamma_x}\right) \sinh(\xi_d (H - h)) e^{-\Gamma} \implies$$

$$A_e \sinh(\xi_c h) = B_e \sinh(\xi_d (H - h)) \quad (3.34)$$

Pela equação 3.31:

$$A_e \sinh(\xi_c h) e^{-\Gamma} = B_e \sinh(\xi_d (H - h)) e^{-\Gamma} \implies$$

$$A_e \sinh(\xi_c h) = B_e \sinh(\xi_d (H - h)) \quad (3.35)$$

Pela equação 3.32:

$$-\left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu}\right) \cosh(\xi_c h) e^{-\Gamma} = -\left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu}\right) \cosh(\xi_d (H - h)) e^{-\Gamma} \implies$$

$$-A_e \xi_c \cosh(\xi_c h) = B_e \xi_d \cosh(\xi_d (H - h)) \quad (3.36)$$

Pela equação 3.33:

$$-\left(\frac{A_e \xi_c}{j\omega\mu}\right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \cosh(\xi_c h) e^{-\Gamma} = -\left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu}\right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \cosh(\xi_d (H - h)) e^{-\Gamma}$$

$$-A_e \xi_c \cosh(\xi_c h) = B_e \xi_d \cosh(\xi_d (H - h)) \quad (3.37)$$

Dividindo a equação 3.36 por 3.34, tem-se:

$$-\xi_c \coth(\xi_c h) = \xi_d \coth(\xi_d (H - h)) \implies$$

$$\xi_c = \frac{-\xi_d \coth(\xi_d (H - h))}{\coth(\xi_c h)} \quad (3.38)$$

e da equação 3.35:

$$A_c = \frac{B_e \sinh(\xi_d (H - h))}{\sinh(\xi_c h)} \quad (3.39)$$

Ainda, pela equação de Helmholtz, na região c:

$$\gamma_x^2 + \xi_c^2 + \gamma_z^2 + K_0^2 \varepsilon_{rc} = 0 \quad (3.40)$$

e na região d:

$$\gamma_x^2 + \xi_d^2 + \gamma_z^2 + K_0^2 \varepsilon_{rd} = 0 \quad (3.41)$$

obtem-se:

$$\xi_c^2 + K_0^2 \varepsilon_{rc} = \xi_d^2 + K_0^2 \varepsilon_{rd}$$

$$H_z^{d,e}(y) = - \left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_d(H-y)) e^{-\Gamma}$$

$$J_x^{d,e}(y) = 0$$

$$J_y^{d,e}(y) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{B_e \xi_d}{j\omega\mu} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_d(H-y)) e^{-\Gamma}$$

$$J_z^{d,e}(y) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left(\frac{B_e (\xi_d^2 + \omega^2 \mu \epsilon)}{j\omega\mu\gamma_x} \right) \sinh(\xi_d(H-y)) e^{-\Gamma}$$

Soluções para os modos LSM

Aplicando as equações de Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$ e $\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E}$, e considerando que, para esses modos, $\vec{H}_y(y) = 0$, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \end{bmatrix} \implies$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma_z E_y = -j\omega\mu H_x \quad (3.42)$$

$$-\gamma_x E_z + \gamma_z E_x = 0 \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} + \gamma_x E_y = j\omega\mu H_z \quad (3.44)$$

Partindo da outra equação de Maxwell, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon \vec{E} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & 0 & H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} = j\omega\epsilon E_x \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = -j\omega\epsilon E_y \\ -\frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \end{bmatrix} \implies$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = j\omega\epsilon E_x \quad (3.45)$$

$$-\gamma_x H_z + \gamma_z H_x = -j\omega\epsilon E_y \quad (3.46)$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (3.47)$$

Região c:

Utilizando o mesmo procedimento, na determinação das equações de campo e os vetores densidade de corrente, para os modos LSM, obtém-se as seguintes equações:

$$E_x^{c,m}(y) = -\left(\frac{A_m \xi_c}{j\omega\epsilon}\right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.48)$$

$$E_y^{c,m}(y) = -A_m \left(\frac{\xi_c^2 + K_0^2 \epsilon_{rc}}{j\omega\epsilon_{rc} \gamma_x}\right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.49)$$

$$E_z^{c,m}(y) = \left(\frac{A_m \xi_c}{j\omega\epsilon}\right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.50)$$

$$H_x^{c,m}(y) = -A_m \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x}\right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.51)$$

$$H_y^{c,m}(y) = 0 \quad (3.52)$$

$$H_z^{c,m}(y) = A_m \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.53)$$

$$J_x^{c,m}(y) = 0 \quad (3.54)$$

$$J_y^{c,m}(y) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} A_m \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma} \quad (3.55)$$

$$J_z^{c,m}(y) = 0 \quad (3.56)$$

Região d:

Analogamente aos procedimentos anteriores, obtém-se:

$$E_x^{d,m}(y) = -B_m \left(\frac{\xi_d}{j\omega\epsilon} \right) \sinh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.57)$$

$$E_y^{d,m}(y) = -B_m \left(\frac{\xi_d^2 + K_0^2 \epsilon_{rd}}{j\omega\epsilon_0 \epsilon_{rd} \gamma_x} \right) \cosh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.58)$$

$$E_z^{d,m}(y) = \left(\frac{B_m \xi_d}{j\omega\epsilon_0 \epsilon_{rd}} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \sinh(\xi_d y) e^{-\Gamma} \quad (3.59)$$

$$H_x^{d,m}(y) = -B_m \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.60)$$

$$H_y^{d,m}(y) = 0 \quad (3.61)$$

$$H_z^{d,m}(y) = B_m \cosh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.62)$$

$$J_x^{d,e}(y) = 0 \quad (3.63)$$

$$J_y^{d,e}(y) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} B_m \cosh(\xi_d (H - y)) e^{-\Gamma} \quad (3.64)$$

$$J_z^{d,e}(y) = 0 \quad (3.65)$$

Aplicando as condições de continuidade $E_t^{c,m} = E_t^{d,m}$ e $H_t^{c,m} = H_t^{d,m}$, onde o índice t refere-se aos campos transversais, obtém-se as relações entre A_m e B_m e entre ξ_c e ξ_d .

$$A_m = \frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \quad (3.66)$$

$$\xi_c = \frac{-\varepsilon_{rd} \xi_d \coth(\xi_c h)}{\coth(\xi_d(H-h))} \quad (3.67)$$

Com isto, reescreve-se as equações para a região c:

$$E_x^{c,m}(y) = - \left(\frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \right) \left(\frac{\xi_c}{j\omega\varepsilon} \right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma}$$

$$E_y^{c,m}(y) = - \left(\frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \right) \left(\frac{\xi_c^2 + K_0^2 \varepsilon_{rc}}{j\omega\varepsilon_{rc} \gamma_x} \right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma}$$

$$E_z^{c,m}(y) = - \left(\frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \right) \left(\frac{\xi_c}{j\omega\varepsilon} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \sinh(\xi_c y) e^{-\Gamma}$$

$$H_x^{c,m}(y) = - \left(\frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \right) \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_x} \right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma}$$

$$H_y^{c,m}(y) = 0$$

$$H_z^{c,m}(y) = \left(\frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma}$$

$$J_x^{c,m}(y) = 0$$

$$J_y^{c,m}(y) = - \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \left(\frac{B_m \cosh(\xi_d(H-h))}{\cosh(\xi_c h)} \right) \cosh(\xi_c y) e^{-\Gamma}$$

$$J_z^{c,m}(y) = 0$$

3.4.2 Análise das Regiões Homogêneas

Novamente, considerando a propagação segundo \hat{x} , toma-se a expressão genérica para os campos elétricos e magnéticos:

$$\vec{E} = \vec{E}(y) e^{-\Gamma}$$

$$\vec{H} = \vec{H}(y) e^{-\Gamma}, \text{ onde}$$

$$\Gamma = \gamma_x x + \gamma_z z \text{ e}$$

$\gamma_{x(z)}$ - é a constante de propagação segundo o eixo $\hat{x}(\hat{z})$.

Soluções para os modos TE

Utilizando as equações de Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$ e $\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$, e considerando que, para esses modos, $\vec{E}_x(y) = 0$, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & E_y & E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu H_z \end{bmatrix} \implies$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu H_x \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu H_y \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu H_z \quad (3.70)$$

Partindo da outra equação de Maxwell, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon \vec{E} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = -j\omega\epsilon E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \end{bmatrix} \implies$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (3.71)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = -j\omega\epsilon E_y \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (3.73)$$

Região a:

Aplicando-se as condições de contorno para a região homogênea, tem-se que, em $y = 0$ e em $y = h$, o campo $E_z(y) = 0$. Uma solução pode ser escrita na forma:

$$E_z^{a,e}(y) = E_0 \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.74)$$

onde

$\gamma_y = \frac{n\pi}{h}$; $n = 0, 1, \dots$ é a constante de propagação na direção \hat{y} ;

e $E_0 = E_0(x)$ é a amplitude do campo, dependente de x .

Da equação 3.69, tem-se:

$$H_y^{a,e}(y) = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \implies$$

$$H_y^{a,e}(y) = \frac{E_0'}{j\omega\mu} \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.75)$$

$$\text{onde } E'_0 = \frac{\partial E_0(x)}{\partial x}.$$

Partindo da equação 3.71, tem-se:

$$H_z^{a,e}(y) = -\gamma_z \int H_y \partial y \Rightarrow$$

$$H_z^{a,e}(y) = \left(\frac{E'_0 \gamma_z}{j\omega\mu\gamma_y} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.76)$$

Da equação 3.73:

$$H_x^{a,e}(y) = \int \left(\frac{\gamma_x^2 + \omega^2 \mu \epsilon}{j\omega\mu} \right) \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \partial y \Rightarrow$$

$$H_x^{a,e}(y) = - \left(\frac{\gamma_x^2 + \omega^2 \mu \epsilon}{j\omega\mu\gamma_y} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.77)$$

Da equação 3.72:

$$-j\omega\epsilon E_y = \gamma_z \left(\frac{\gamma_x^2 + \omega^2 \mu \epsilon}{j\omega\mu\gamma_y} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} + \left(\frac{E''_0 \gamma_z}{j\omega\mu\gamma_y} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \Rightarrow$$

onde

$$E''_0 = \frac{\partial E'_0(x)}{\partial x} = \gamma_x^2 E_0(x).$$

$$E_y^{a,e}(y) = \left(\frac{E_0 \gamma_z}{\gamma_y} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.78)$$

Região b:

Observando as condições de contorno para a região, tem-se que em $y = h$, e em $y = H$, o campo $E_z(y) = 0$. Uma solução pode ser escrita na forma:

$$E_z^{b,e}(y) = E_0 \sin(\gamma_y(H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.79)$$

onde

$\gamma_y = \frac{n\pi}{(H-h)}$; $n = 0, 1, \dots$ é a constante de propagação na direção \hat{y} ;

e $E_0 = E_0(x)$ é a amplitude do campo, dependente de x .

Da equação 3.69, tem-se:

$$H_y^{b,e}(y) = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \implies$$

$$H_y^{b,e}(y) = \frac{E_0'}{j\omega\mu} \sin(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.80)$$

Partindo da equação 3.71, tem-se:

$$H_z^{b,e}(y) = -\gamma_z \int H_y^{b,e} \partial y \implies$$

$$H_z^{b,e}(y) = \left(\frac{E_0' \gamma_z}{j\omega\mu \gamma_y} \right) \cos(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.81)$$

Da equação 3.73:

$$H_x^{b,e}(y) = \int E_0 \left(\frac{\gamma_x^2 + \omega^2 \mu \epsilon}{j\omega\mu} \right) \sin(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} \partial y \implies$$

$$H_x^{b,e}(y) = -E_0 \left(\frac{\gamma_x^2 + \omega^2 \mu \epsilon}{j\omega\mu \gamma_y} \right) \cos(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.82)$$

Da equação 3.72:

$$-j\omega\epsilon E_y = \gamma_z \left(\frac{\gamma_x^2 + \omega^2 \mu \epsilon}{j\omega\mu \gamma_y} \right) \cos(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} + \left(\frac{E_0'' \gamma_z}{j\omega\mu \gamma_y} \right) \cos(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} \implies$$

$$E_y^{b,e}(y) = \left(\frac{E_0 \gamma_z}{\gamma_y} \right) \cos(\gamma_y(H-y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.83)$$

Para o cálculo do vetores densidade de corrente, \vec{J} , aplica-se a equação abaixo em cada região:

$$\vec{J} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ H_x & H_y & H_z \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} J_x &= 0 \\ J_y &= -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_z \\ J_z &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_y \end{aligned}$$

Para a **região a**, as equações para as densidades de corrente ficam:

$$J_x^{a,e}(y) = 0 \quad (3.84)$$

$$J_y^{a,e}(y) = -\left(\frac{E'_0 \gamma_z}{j\omega \mu \gamma_y}\right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.85)$$

$$J_z^{a,e}(y) = \frac{E'_0}{j\omega \mu} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.86)$$

Aplicando agora para a **região b**, tem-se:

$$J_x^{b,e}(y) = 0 \quad (3.87)$$

$$J_y^{b,e}(y) = -\left(\frac{E'_0 \gamma_z}{j\omega \mu \gamma_y}\right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.88)$$

$$J_z^{b,e}(y) = -\frac{E'_0}{j\omega \mu} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.89)$$

Soluções para os modos TM

Utilizando as equações de Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$ e $\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$, e considerando que, para esses modos, $\vec{H}_x(y) = 0$, tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \implies$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = j\omega\mu H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \end{bmatrix} \implies$$

De $\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & H_y & H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega\varepsilon E_x \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} = -j\omega\varepsilon E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} = j\omega\varepsilon E_z \end{bmatrix} \implies$$

Utilizando o mesmo procedimento adotado na determinação das equações de campo para os modos TE, obtém-se:

Região a:

$$H_x^{a,m}(y) = 0 \quad (3.90)$$

$$H_y^{a,m}(y) = H_0 \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.91)$$

$$H_z^{a,m}(y) = \left(\frac{H'_0 \gamma_y}{\gamma_z} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.92)$$

$$E_x^{a,m}(y) = -H_0 \left(\frac{\gamma_y^2 - \gamma_z^2}{j\omega\varepsilon\gamma_z} \right) \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.93)$$

$$E_y^{a,m}(y) = \left(\frac{-H'_0 \gamma_y}{j\omega\varepsilon\gamma_z} \right) \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.94)$$

$$E_z^{a,m}(y) = \left(\frac{-H'_0 \gamma_y}{j\omega \epsilon \gamma_z} \right) \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.95)$$

$$J_x^{a,m}(y) = 0 \quad (3.96)$$

$$J_y^{a,m}(y) = \left(\frac{H'_0 \gamma_y}{\gamma_z} \right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.97)$$

$$J_z^{a,m}(y) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_0 \sin(\gamma_y y) e^{-\gamma_z z} \quad (3.98)$$

Região b:

$$H_x^{b,m}(y) = 0 \quad (3.99)$$

$$H_y^{b,m}(y) = H_0 \sin(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.100)$$

$$H_z^{a,m}(y) = -\left(\frac{H_0 \gamma_y}{\gamma_z} \right) \cos(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.101)$$

$$E_x^{a,m}(y) = -H_0 \left(\frac{\gamma_y^2 - \gamma_z^2}{j\omega \epsilon \gamma_z} \right) \sin(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.102)$$

$$E_y^{a,m}(y) = \left(\frac{H'_0 \gamma_y}{j\omega \epsilon \gamma_z} \right) \cos(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.103)$$

$$E_z^{a,m}(y) = \left(\frac{H'_0}{j\omega \epsilon} \right) \sin(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.104)$$

$$J_x^{a,m}(y) = 0 \quad (3.105)$$

$$J_y^{a,m}(y) = -\left(\frac{H_0 \gamma_y}{\gamma_z} \right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.106)$$

$$J_z^{a,m}(y) = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_0 \sin(\gamma_y (H - y)) e^{-\gamma_z z} \quad (3.107)$$

3.5 Determinação dos Produtos Escalares

A partir do desenvolvimento de cada termo da matriz admitância, será realizado cada produto escalar $\langle \phi_{a(b)}^{y(z)} | f_{a(b,cd)}^{y(z)} \rangle$, a fim de defini-la analiticamente.

Define-se então as funções de teste utilizadas, que serão do mesmo tipo definida em Gomes Neto [1] observando-se as condições de contorno da estrutura.

$$\phi_{a,i}^y = \sqrt{\frac{\xi_i}{h}} \cos\left(\frac{i\pi y}{h}\right) \quad (3.108)$$

$$\phi_{a,j}^z = \sqrt{\frac{\xi_j}{h}} \cos\left(\frac{j\pi y}{h}\right) \quad (3.109)$$

$$\phi_{b,i}^y = \sqrt{\frac{\xi_i}{(H-h)}} \cos\left(\frac{i\pi(H-y)}{(H-h)}\right) \quad (3.110)$$

$$\phi_{b,j}^z = \sqrt{\frac{\xi_j}{(H-h)}} \cos\left(\frac{j\pi(H-y)}{(H-h)}\right) \quad (3.111)$$

As funções de base estão diretamente relacionadas com as soluções das equações de campo desenvolvidas na seção 3.4. Assim, as relações entre os campos E e H para cada região da estrutura e as funções de base são:

Região a

$$\begin{cases} f_a^y = F_y^a \\ f_a^z = F_z^a \end{cases}$$

Região b

$$\begin{cases} f_b^y = F_y^b \\ f_b^z = F_z^b \end{cases}$$

Região c

$$\begin{cases} f_c^y = J_y^c \\ f_c^z = J_z^c \end{cases}$$

Região d

$$\begin{cases} f_d^y = J_y^d \\ f_d^z = J_z^d \end{cases}$$

Com isto, cada produto escalar é identificado abaixo, onde é mostrado apenas o resultado, visto que no desenvolvimento é utilizado integração simples do produto da função de teste pela função de base. Considera-se como limites de integração, os limites de cada sub-região da estrutura. Tem-se então nas **sub-regiões a e c** limite inferior 0 (o plano de terra) e limite superior h (a espessura do substrato dielétrico). Nas **sub-regiões b e d** limite inferior h (a espessura do substrato dielétrico) e limite superior H (a altura da blindagem superior).

PRODUTOS ESCALARES

Modos TE

$$\langle \phi_a^y | f_{a,n}^y \rangle = \frac{-\gamma_z e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{ya}$$

$$\langle \phi_a^z | f_{a,n}^z \rangle = \frac{\gamma_y e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{za}$$

$$\langle \phi_b^y | f_{b,n}^y \rangle = \frac{-\gamma_z e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{yb}$$

$$\langle \phi_b^z | f_{b,n}^z \rangle = \frac{\gamma_y e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{zb}$$

onde:

$n_{ya(b)}$ – número de funções de teste segundo a direção \hat{y} na subregião $a(b)$;

$n_{za(b)}$ – número de funções de teste segundo a direção \hat{z} na subregião $a(b)$;

Modos TM

$$\langle \phi_a^y | f_{a,n}^y \rangle = j \left(\frac{\gamma_y}{\gamma_z} \right) \frac{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^*} e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{ya}$$

$$\langle \phi_a^z | f_{a,n}^z \rangle = \frac{j\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^*} e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{za}$$

$$\langle \phi_b^y | f_{b,n}^y \rangle = -j \left(\frac{\gamma_y}{\gamma_z} \right) \frac{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^*} e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{yb}$$

$$\langle \phi_b^z | f_{b,n}^z \rangle = \frac{j\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^*} e^{-\gamma_z z}}{\sqrt{\gamma_z \times \gamma_z^* + \gamma_y^2}}, n = 0, \dots, n_{zb}$$

Modos LSE

$$\langle \phi_a^y | f_{c,n}^y \rangle = -C_1 B_e \sqrt{\frac{\xi_p}{h}} \left(\frac{\xi_d \gamma_z}{j K_c \gamma_x} \right) \frac{\cosh(\xi_d (H - h))}{\cosh(\xi_c h)} e^{-\Gamma}$$

onde

$$C_1 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{h}{\xi_p}, \text{ se } \xi_c = \frac{j p \pi}{h} \\ \frac{\xi_c \sinh(\xi_c h) (-1)^p}{\xi_c^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2}, \text{ se } \xi_c \neq \frac{j p \pi}{h} \end{array} \right\}$$

$$\langle \phi_a^z | f_{c,n}^z \rangle = -C_2 B_e \sqrt{\frac{\xi_p}{h}} \left(\frac{\xi_d^2 + K_c^2}{j K_n \gamma_x} \right) \frac{\sinh(\xi_d (H - h))}{\sinh(\xi_c h)} e^{-\Gamma}$$

onde

$$C_2 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{j h}{\xi_q}, \text{ se } \xi_c = \frac{j q \pi}{h} \\ \frac{\xi_c \sinh(\xi_c h) (-1)^q}{\xi_c^2 + \left(\frac{q\pi}{h}\right)^2}, \text{ se } \xi_c \neq \frac{j q \pi}{h} \end{array} \right\}$$

$$\langle \phi_b^y | f_{d,n}^y \rangle = -C_3 B_e \sqrt{\frac{\xi_p}{(H - h)}} \left(\frac{\xi_d \gamma_z}{j K_c \gamma_x} \right) e^{-\Gamma}$$

onde

$$C_3 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{j(H-h)}{\xi_p}, \text{ se } \xi_d = \frac{jp\pi}{(H-h)} \\ \frac{\xi_d \sinh(\xi_d(H-h)) (-1)^p}{\xi_d^2 + \left(\frac{p\pi}{(H-h)}\right)^2}, \text{ se } \xi_d \neq \frac{jp\pi}{(H-h)} \end{array} \right\}$$

$$\langle \phi_b^z | f_{d,n}^z \rangle = -C_4 B_e \sqrt{\frac{\xi_q}{(H-h)}} \left(\frac{\xi_d^2 + K_c^2}{jK_n \gamma_x} \right) e^{-\Gamma}$$

onde

$$C_4 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{j(H-h)}{\xi_q}, \text{ se } \xi_d = \frac{jq\pi}{(H-h)} \\ -\frac{\left(\frac{q\pi}{(H-h)}\right) \sinh(\xi_d(H-h)) (-1)^q}{\xi_d^2 + \left(\frac{q\pi}{(H-h)}\right)^2}, \text{ se } \xi_d \neq \frac{jq\pi}{(H-h)} \end{array} \right\}$$

Modos LSM

$$\langle \phi_a^y | f_{c,n}^y \rangle = -C_5 B_m \sqrt{\frac{\xi_p \mu_0 \cosh(\xi_d(H-h))}{h \epsilon_{rc} \cosh(\xi_c h)}} e^{-\Gamma}$$

onde

$$C_5 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{h}{\xi_p}, \text{ se } \xi_c = \frac{jp\pi}{h} \\ \frac{\xi_c \sinh(\xi_c h) (-1)^p}{\xi_c^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2}, \text{ se } \xi_c \neq \frac{jp\pi}{h} \end{array} \right\}$$

$$\langle \phi_a^z | f_{c,n}^z \rangle = 0$$

$$\langle \phi_b^y | f_{d,n}^y \rangle = -C_6 B_m \sqrt{\frac{\xi_p \mu_0}{(H-h) \epsilon_{rc}}} e^{-\Gamma}$$

onde

$$C_6 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(H-h)}{\xi_p}, \text{ se } \xi_d = \frac{jp\pi}{(H-h)} \\ \frac{\xi_d \sinh(\xi_d(H-h)) (-1)^p}{\xi_d^2 + \left(\frac{p\pi}{(H-h)}\right)^2}, \text{ se } \xi_d \neq \frac{jp\pi}{(H-h)} \end{array} \right\}$$

$$\langle \phi_b^z | f_{d,n}^z \rangle = 0$$

3.6 Cálculo do Operador Admitância na Descontinuidade

Considere-se inicialmente a simetria da estrutura, conforme a figura 3.4:

Para o cálculo do operador admitância na descontinuidade, deve-se observar que há duas avaliações:

- i) admitância deslocada a partir do plano de simetria, nas sub-regiões a e b;
- ii) admitância deslocada a partir da parede lateral.

Em ambos os casos, utiliza-se a expressão genérica[12]:

$$Y_n(x) = Y_0 \frac{Y_L + Y_0 \tanh(\gamma l)}{Y_0 + Y_L \tanh(\gamma l)} \quad (3.112)$$

onde

Y_0 é a admitância característica do meio, dada pelas seguintes expressões:

$$Y_0^{TE} = \frac{\gamma_x}{jK_0}$$

$$Y_0^{TM} = j \frac{K_0 \epsilon_r}{\gamma_x}$$

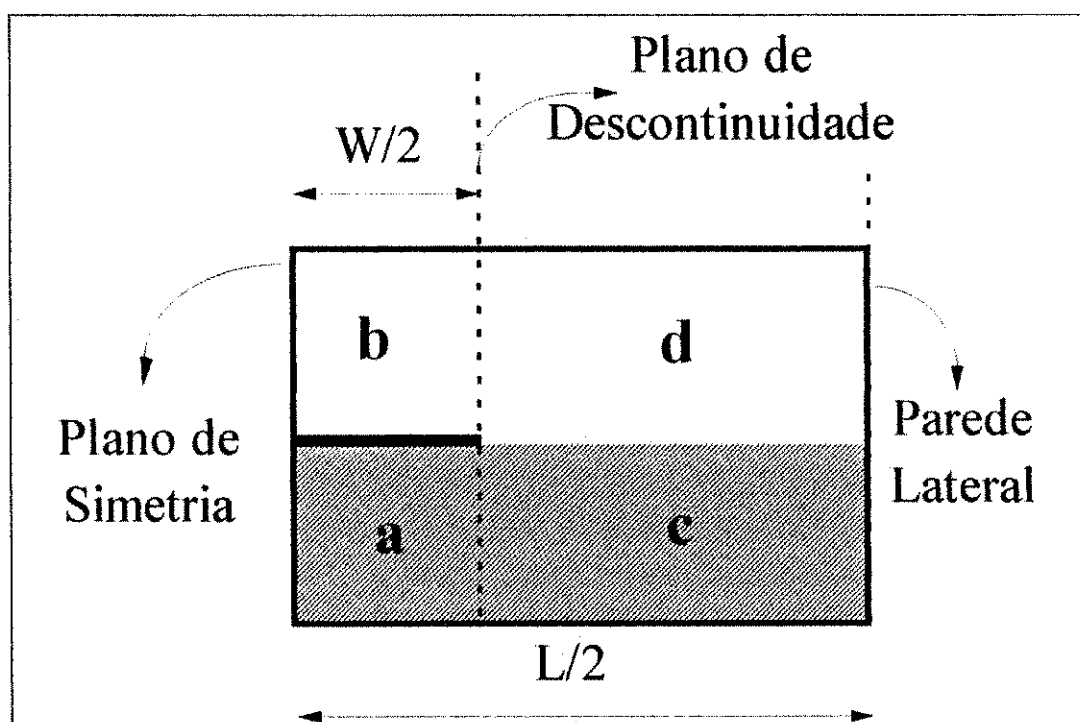


Figura 3.4: Simetria da estrutura

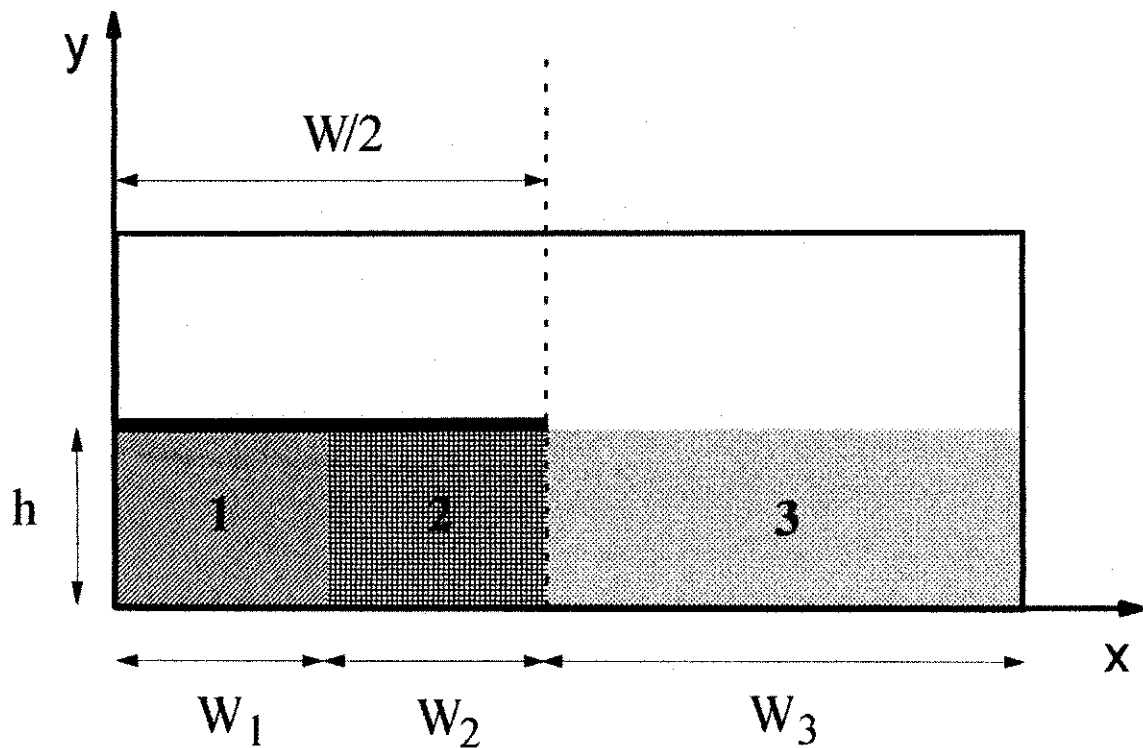


Figura 3.5: Estrutura com duas camadas abaixo da fita

Y_L é a admitância da carga, ou seja, a admitância do plano considerado (plano de simetria ou parede lateral);

l é a distância na qual deseja-se calcular a admitância, devendo ser considerado também, o sentido de propagação através do sinal ($+l$ ou $-l$);

K_0 é o número de onda no espaço livre.

Para efeito de verificar a aplicação da expressão 3.112 para múltiplas camadas dielétricas, considere-se um exemplo de duas camadas abaixo da fita, conforme a figura 3.5:

O equivalente em linhas de transmissão seria de acordo com a figura 3.6:

onde

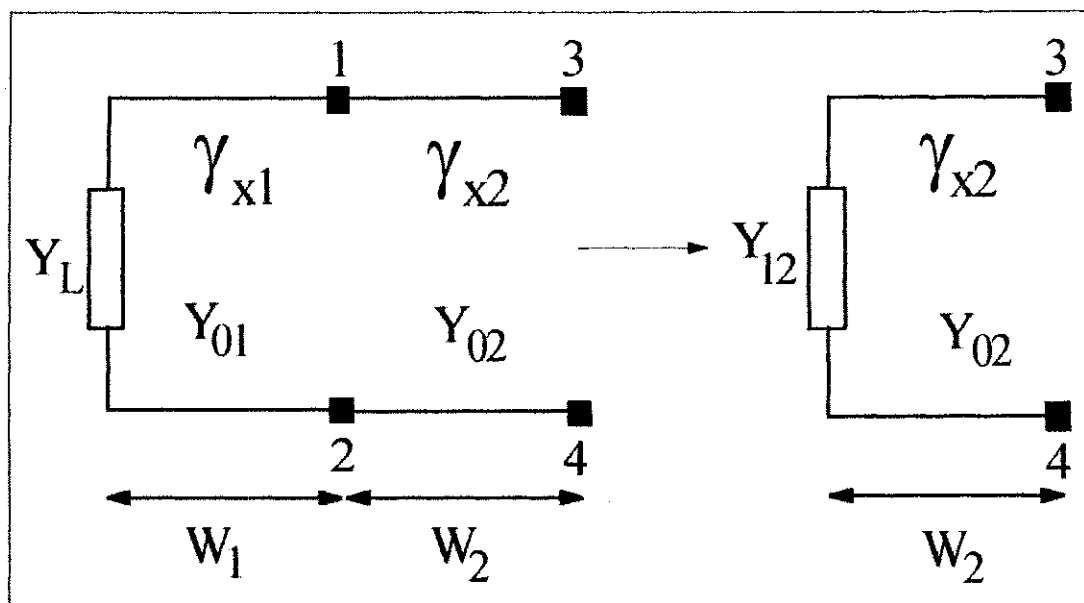


Figura 3.6: Equivalente em linhas de transmissão

Y_L é a admitância do plano de simetria;

Y_{12} é a admitância deslocada para w_1 , ou seja, na interface entre os dielétricos 1 e 2.;

Y_{34} é a admitância na descontinuidade;

$\gamma_{x,1(2)}$ é a constante de propagação na direção \hat{x} no meio 1(2);

$W_{1(2)}$ é a largura do dielétrico 1(2).

Caso a: o plano de simetria é uma parede elétrica.

Para este caso, sabe-se que:

$$Y_L \rightarrow \infty$$

A expressão para Y_{12} é:

$$Y_{12} = Y_{01} \frac{Y_L + Y_{01} \coth(\gamma_{x,1} W_1)}{Y_{01} + Y_L \coth(\gamma_{x,1} W_1)} \Rightarrow$$

Avaliando-se a situação em que a estrutura é lateralmente aberta, toma-se a expressão

$$Y = \frac{1}{N^*}$$

onde N é dado por:

$$N = \int_0^h E_y^* \cdot J_y dy + \int_0^h E_z^* \cdot J_z dy + \int_h^H E_y^* \cdot J_y dy + \int_h^H E_z^* \cdot J_z dy$$

e N^* é o conjugado complexo de N .

Considerando-se a estrutura fechada lateralmente, o deslocamento é feito analogamente ao caso do cálculo a partir do plano de simetria.

Observe-se que, nas duas situações consideradas, a partir da parede lateral, as expressões acima são válidas até a mudança de um meio para outro. A partir deste ponto, utiliza-se a expressão genérica 3.117 para o cálculo até a descontinuidade.

3.7 Estruturação do Programa

Como já observado anteriormente, o processamento analítico exigido pela MTRT é o ponto de partida para a implementação do programa computacional. De acordo com os procedimentos da técnica, descritas no capítulo 2, a determinação das condições de ressonância de uma estrutura é realizada numericamente. Basicamente, o procedimento numérico exige a montagem da matriz admitância $[Y]$ para cada frequência e com a variação da constante de propagação de um modo, atinge-se a esta condição quando o determinante da matriz $[Y]$ é nulo.

O programa computacional obedece ao fluxograma simplificado apresentado na figura 3.8:

Detalhando um pouco mais o fluxograma apresentado, tem-se:

a) é definido inicialmente a faixa e o passo de frequência a ser analisado;

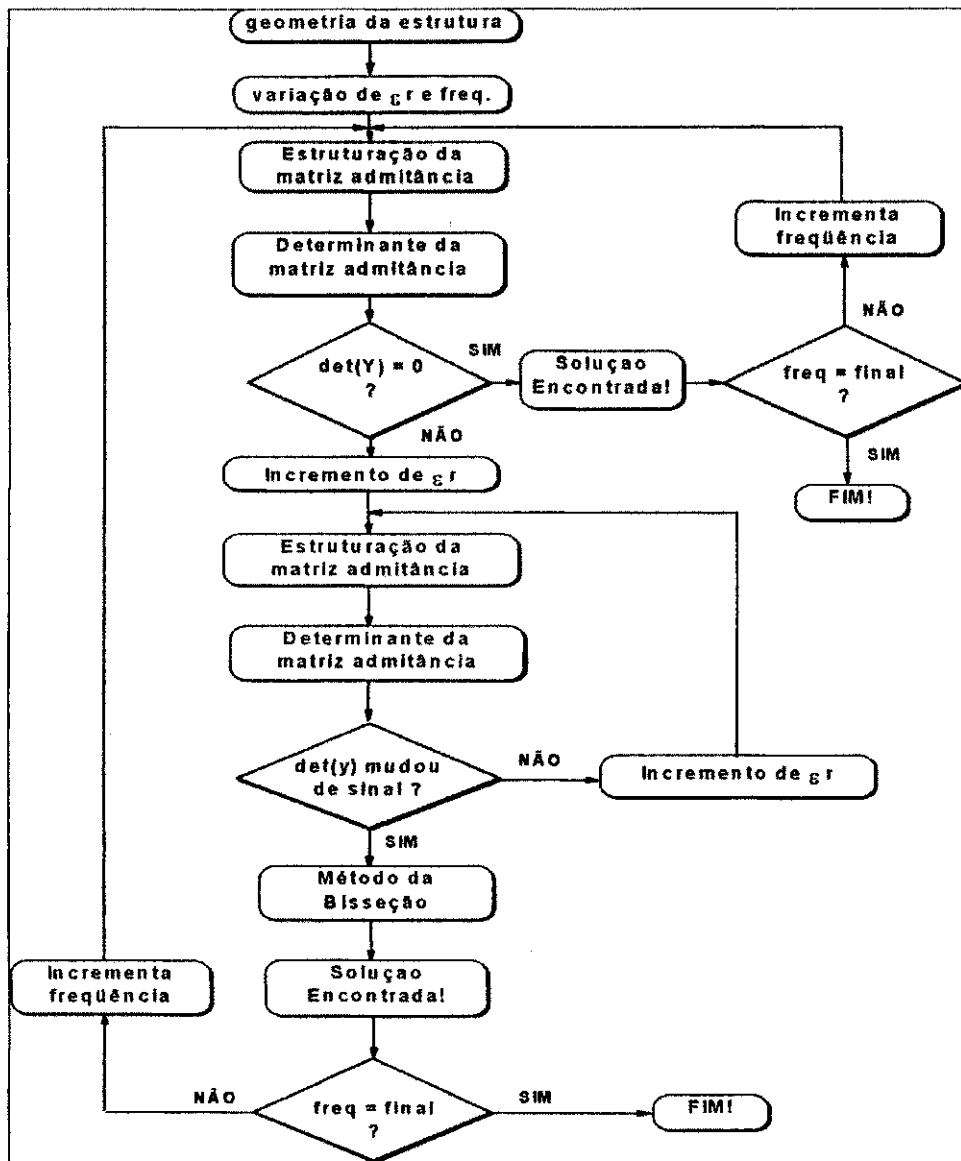


Figura 3.8: Fluxograma simplificado da implementação computacional

b) impõe-se um valor inicial e final para a constante dielétrica efetiva, numa dada frequência. O determinante da matriz é calculado para cada valor e quando ele muda de sinal, há a indicação de uma passagem pelo zero.

c) para a busca do valor da constante dielétrica efetiva, tal que o determinante seja nulo, é utilizado o método da bisseção [22]. Por este método, quando há mudança de sinal do determinante entre dois valores quaisquer, ϵ_{effa} e ϵ_{effb} , seu cálculo será realizado sobre o valor médio, ou seja, $\frac{\epsilon_{effa} + \epsilon_{effb}}{2}$. Dependendo do sinal resultante do novo determinante calculado, será escolhido um novo intervalo para busca: $\left[\epsilon_{effa}; \frac{\epsilon_{effa} + \epsilon_{effb}}{2} \right]$ ou $\left[\frac{\epsilon_{effa} + \epsilon_{effb}}{2}; \epsilon_{effb} \right]$;

d) a precisão definida para o método da bisseção é de 0.1%. Esta diferença percentual relaciona o valor das duas últimas constantes dielétricas efetivas encontradas.

O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++ ([23], [24], [25], [26] e [27]). Uma característica importante desta linguagem, em comparação às linguagens mais comumente utilizadas na área de microondas, como FORTRAN ou MATLAB, é o seu alto grau de desempenho em função dos recursos de otimização do uso de memória e velocidade de processamento. Estas características são fundamentais para o desenvolvimento de programas rápidos e com baixo consumo de memória.

Analisando o uso de memória, a linguagem oferece recursos como alocação dinâmica, onde sua utilização para uma matriz de dados, por exemplo, é requisitada apenas no momento da chamada ao método (função). Com isto, o código executável final é bem menor do que o código gerado com a declaração das matrizes como variável estática.

Já no item velocidade de processamento, o controle sobre as características de algumas variáveis e operações lógicas e aritméticas cresce o desempenho do software. Tem-se a possibilidade, por exemplo, de colocar os contadores de laços em variáveis do tipo registrador, onde seu incremento e decremento é realizado nos próprios registradores de propósito geral da CPU, evitando assim acessos à memória, mais lentos.

A disponibilidade de se projetar uma interface mais intuitiva e amigável, utilizando-se de menus, ícones, janelas, quadros de diálogos, entre outros, através do uso de ferramentas de programação visual, é um fator importante que deve ser considerado quando os objetivos do programa são educacionais. Neste sentido, a fácil transportabilidade de

programas escritos em C/C++ para ambientes operacionais gráficos, como Windows ou X-Windows, viabiliza a distribuição de cópias do software.

Capítulo 4

Resultados Numéricos

Neste capítulo são apresentados os resultados da implementação computacional. O programa foi desenvolvido em linguagem C++, para plataformas operacionais baseados em DOS e arquiteturas de hardware compatíveis com IBM-PC.

4.1 Resultados e Convergência

As características dispersivas das diversas linhas de microfita analisadas estão separadas por seção. A forma de particularização da estrutura generalizada para um caso específico é detalhado em cada seção a seguir.

Na maioria dos casos, utilizaram-se 3 funções de teste em cada direção \hat{x} e \hat{y} nas subregiões homogêneas e considerados 20 modos na subregião não-homogênea. Com os parâmetros de entrada do programa assumindo estes valores pré-definidos, foi obtida uma boa precisão numérica e quando os resultados não concordavam com os encontrados na literatura, procurou-se ajustá-los de tal forma que houvesse convergência. Esses ajustes foram realizados em alguns parâmetros relativos à precisão numérica, como o número de funções de teste em cada direção e o número de modos na região não-homogênea. As soluções que geravam um erro percentual acima de 5%, em relação às referências bibliográficas, foram consideradas imprecisas.

Como os casos analisados supunham apenas o modo fundamental em propagação, o plano de simetria da estrutura foi considerado uma parede magnética.

Observando a convergência do método, observa-se nas figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15, que um parâmetro bastante importante, para se obter uma boa precisão numérica em relação aos resultados encontrados na literatura, é a quantidade de modos (LSE+LSM) propagantes na região não-homogênea das estruturas. Como este parâmetro influencia diretamente no tempo de processamento, deve-se observar seu valor ideal para que se obtenha uma boa precisão aliada a um baixo tempo de processamento. Assim, de acordo com os testes apresentados, a partir de 20 modos a precisão é boa e pode-se ajustar este valor para 30 ou 40 modos, se os resultados não forem satisfatórios.

4.2 Linha de Microfita Uniforme

Para a análise da linha de microfita isotrópica convencional, a particularização é realizada considerando:

- a) na região inferior à fita condutora, toma-se uma camada dielétrica sob ela e uma fora (até a parede lateral ou infinita), de igual valor ϵ_r ;
- b) na região superior, a permissividade dielétrica do material é definida como $\epsilon_r = 1$, portanto, considerado espaço livre.

Os resultados obtidos, já analisados anteriormente utilizando a MTRT [1], servem para validar a proposta deste trabalho.

A estrutura da figura 4.1, foi analisado em [28].

No caso da figura 4.2, os resultados são comparados com um clássico da literatura sobre as linhas de microfita [29], que determina suas propriedades dispersivas através da aplicação do Método de Galerkin no domínio espectral. Neste trabalho, a estrutura é uma linha de microfita aberta lateralmente e sem blindagem superior (top cover). Portanto, para realizar a simulação a largura da estrutura é considerada infinita, $L \rightarrow \infty$, e a aproximação da altura da blindagem para $H \geq 6 \times h$.

Em ambos os casos, seguindo estas considerações, os resultados apresentados obtiveram excelentes concordâncias

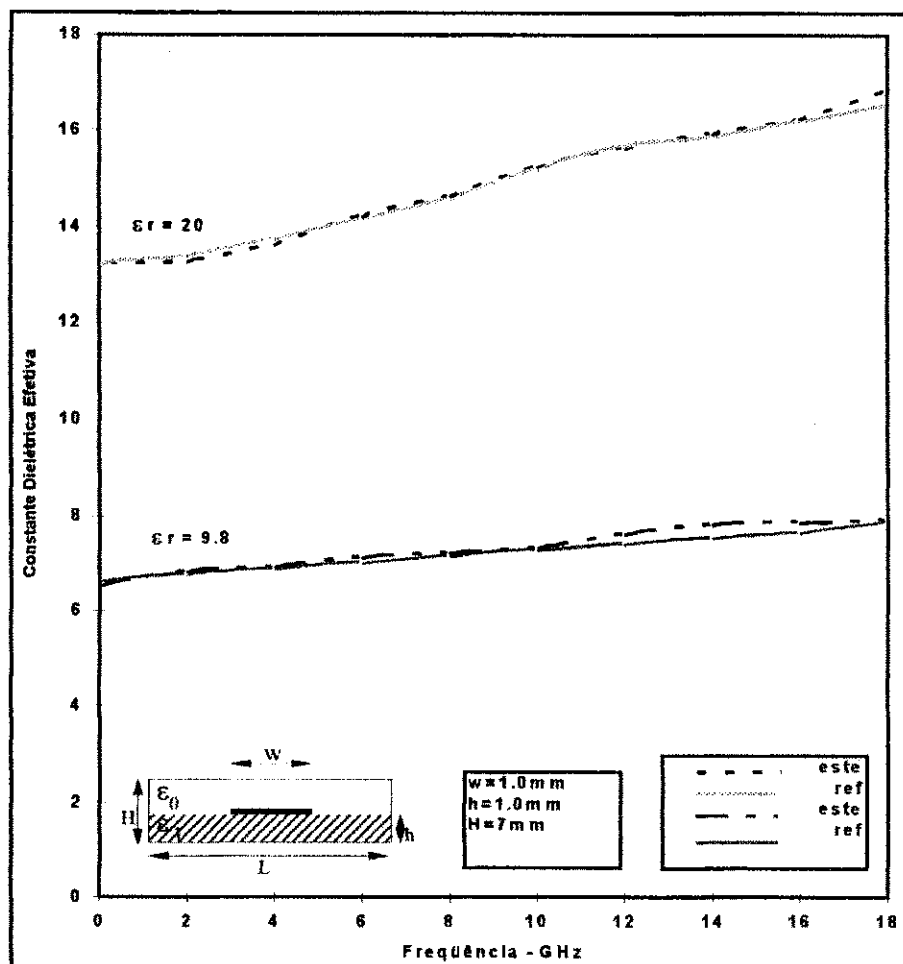


Figura 4.1: Linha de microfita uniforme convencional. Ref [28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92

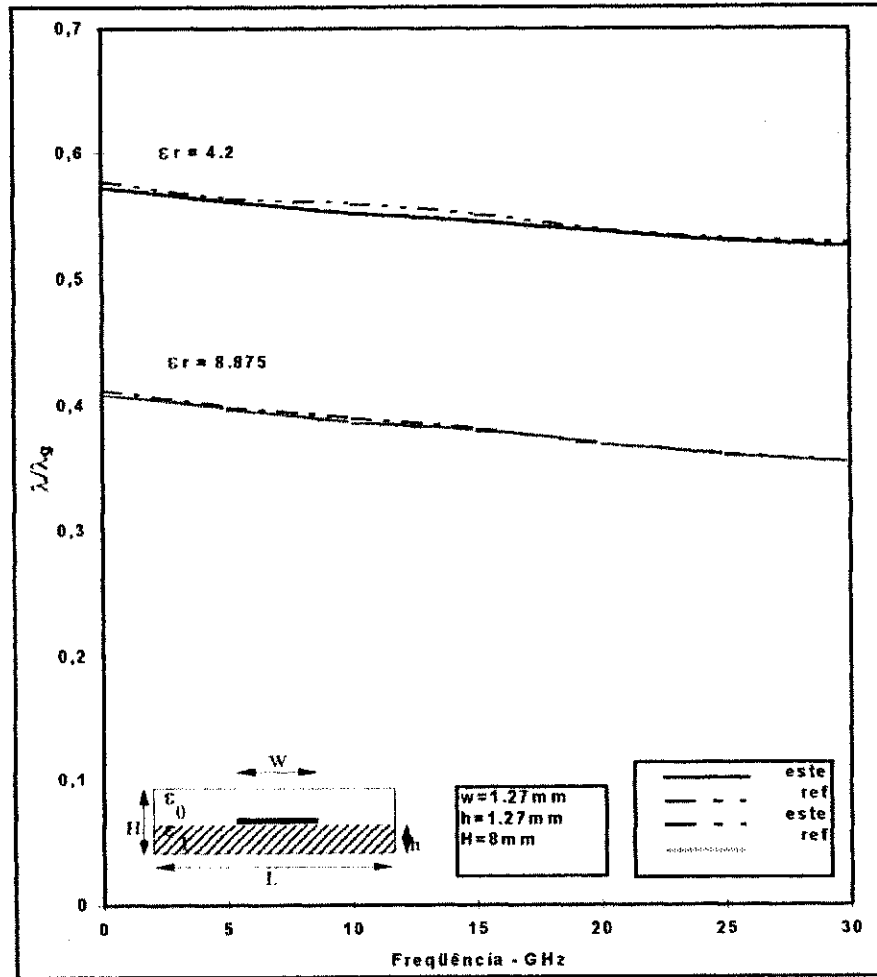


Figura 4.2: Linha de microfita uniforme convencional. Ref[29] : T.Itoh and R.Mittra - IEEE MTT - 73

4.3 Linha de Microfita com Dielétrico de Largura Finita

Segundo J.-D. Tseng [2], os avanços no estudo dos circuitos integrados monolíticos em microondas e dos dispositivos eletroópticos, tem colocado as linhas de microfita com dielétrico de largura finita num patamar elevado de importância, tal que análises rigorosas são necessárias, inclusive as que considerem as características de propagação dos modos de ordem superior.

Tem sido observado neste tipo de estrutura, que o comprimento de onda do guia, λ_g , cresce quando a razão $\frac{a}{w}$ decresce. Isto pode ser interpretado como parte da energia eletromagnética armazenada no dielétrico se espalhasse no ar à medida que ocorre a diminuição da largura do substrato, a , aproximando-se da largura da fita condutora, w . Outra observação feita é que os modos dominantes praticamente permanecem os mesmos, quando a largura do substrato varia de $a = L$ para $a = \frac{L}{2}$.

Na aplicação da MTRT no estudo destas estruturas, considera-se uma camada dielétrica abaixo da fita e outra, de igual valor, ϵ_r , imediatamente fora. A distância da parede lateral em relação ao plano de simetria é ajustado, variando-se L , de acordo com a estrutura utilizada como referência. A mesma consideração é observada para a altura da blindagem superior, H .

Os resultados apresentados nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5 ($L = 5w$), também apresentam uma ótima concordância com a literatura especializada. No trabalho apresentado em [2], o método do casamento modal é utilizado para observar o efeito da largura finita do substrato nas características dispersivas do modo dominante de microfita blindada eletricamente e também na geração dos modos de ordem superior. Em [4], o método das linhas é aplicado para avaliar o efeito da proximidade da borda dielétrica na característica de propagação da linha de microfita, em baixas frequências, limitadas a banda K. Na comparação, observa-se que o aumento da largura da camada dielétrica fora da fita provoca o crescimento de ϵ_{eff} , limitando-o ao resultado da linha de microfita uniforme.

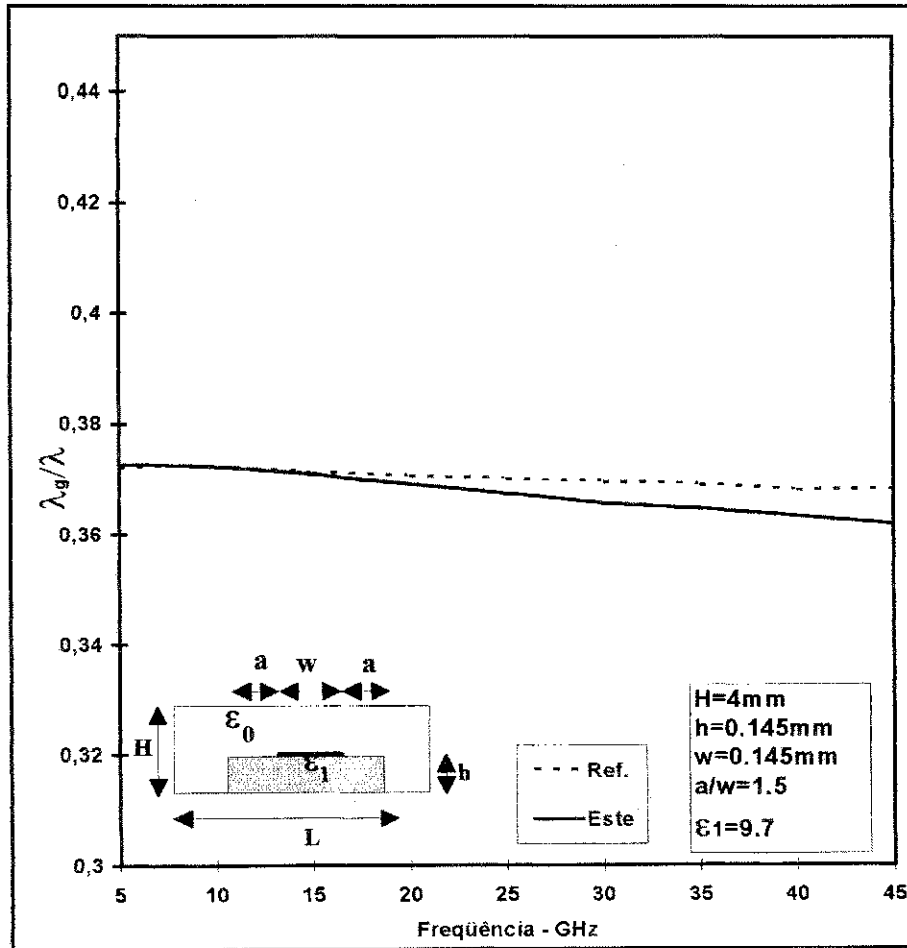


Figura 4.3: Efeito da largura finita do substrato dielétrico. Ref[5]: A. Rong and S. Li - Electronics Letters - 1990

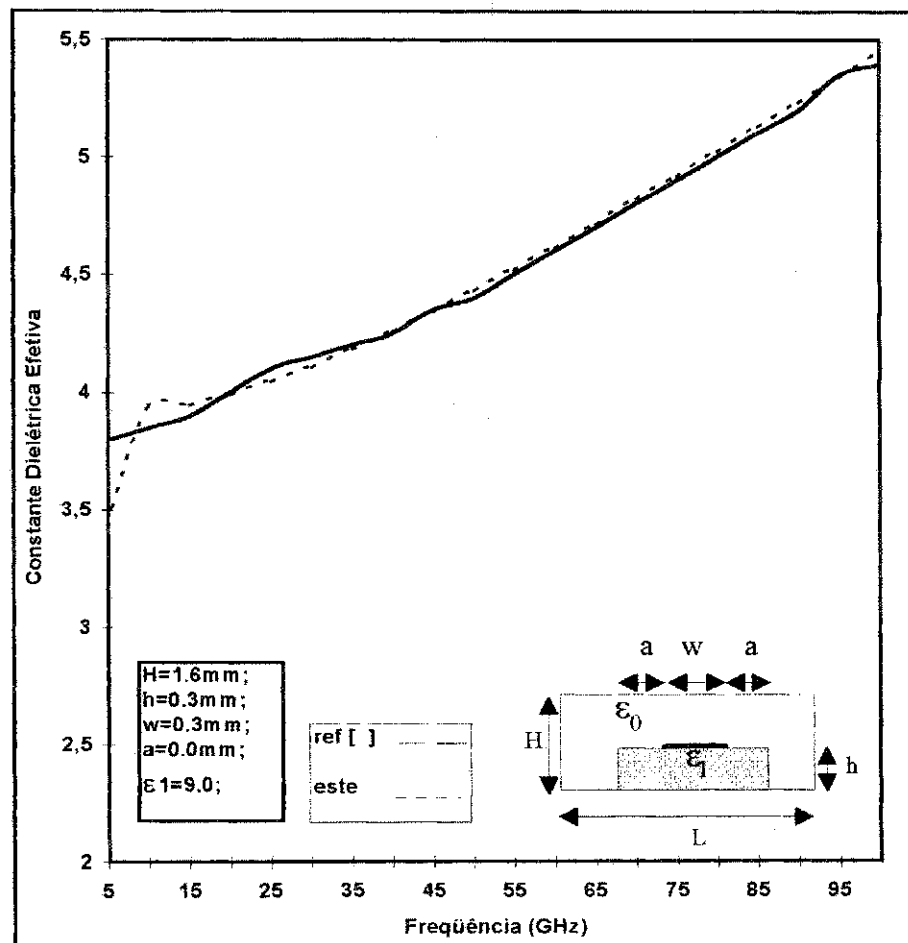


Figura 4.4: Efeito da largura finita do substrato dielétrico. Ref[3]: Yang and Shafai - IEEE MTT - 94

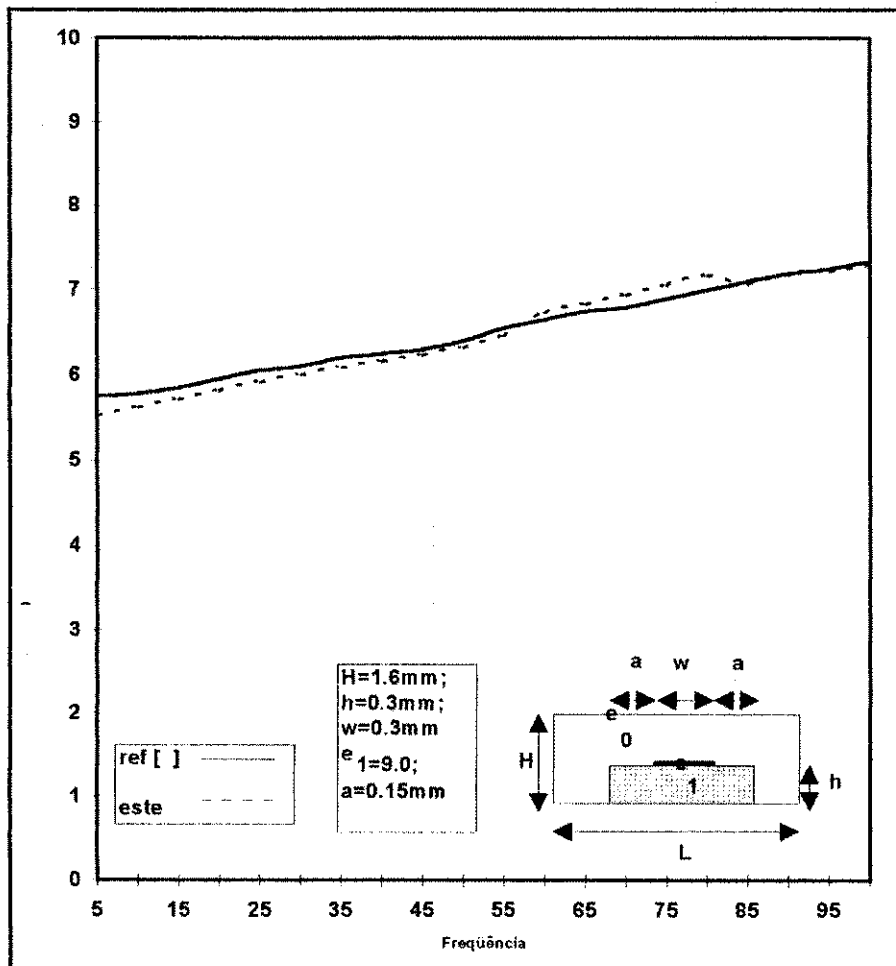


Figura 4.5: Efeito da largura finita do substrato dielétrico. Ref[3]: Yang and Shafai - IEEE MTT - 94

4.4 Covered Microstrip e variações

Em recentes trabalhos, as linhas de microfita com um superestrato adicionado, denominadas de *covered microstrip* ou *microstrip with overlay*, tem sido investigadas através de diferentes métodos, como Função Diádica de Green no Domínio Espectral [30][9], Método de Galerkin no Domínio Espectral [7], Método dos Elementos Finitos com Técnicas de Mapeamento Conforme [8] e uma variação do Modelo Dispersivo de Getsinger [6].

Os resultados apresentados neste trabalho estão em concordância com estes encontrados na literatura, onde mostra-se que a inserção de uma camada dielétrica na região superior à fita metálica aumenta a permissividade dielétrica efetiva em relação à mesma estrutura sem o superestrato (figuras 4.6, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11).

Isto também é estendido a comparação entre dois superestratos de permissividades diferentes, onde o de constante dielétrica superior tem maior influência no aumento da constante dielétrica efetiva da estrutura, do que o de permissividade menor. As estruturas propostas aqui foram denominadas de *covered microstrip-like lines* (figuras 4.8-4.11).

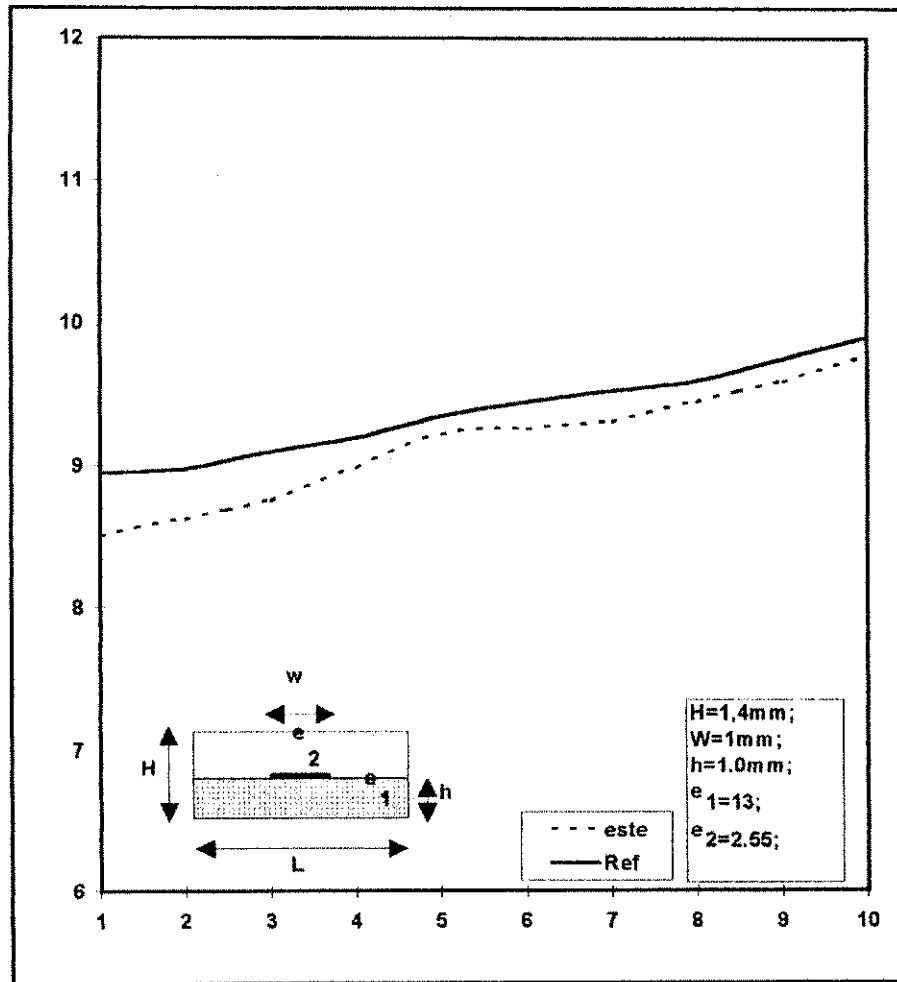


Figura 4.6: Covered microstrip. Ref [8] : C.-N.Chang and J.-F.Cheng - IEE Proc. MAP - 94

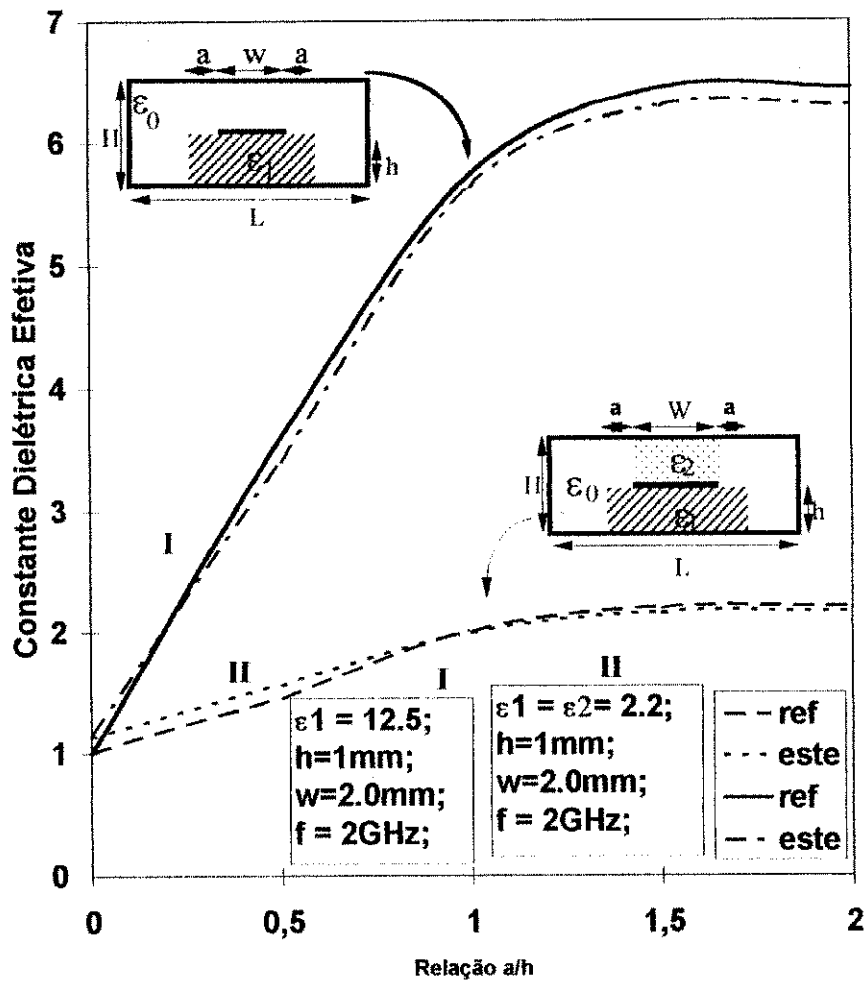


Figura 4.7: Covered microstrip com dielétrico de largura finita. Ref[31]: A. Nyshadham and K.V.S. Rao - IEEE MTT - Jan 91

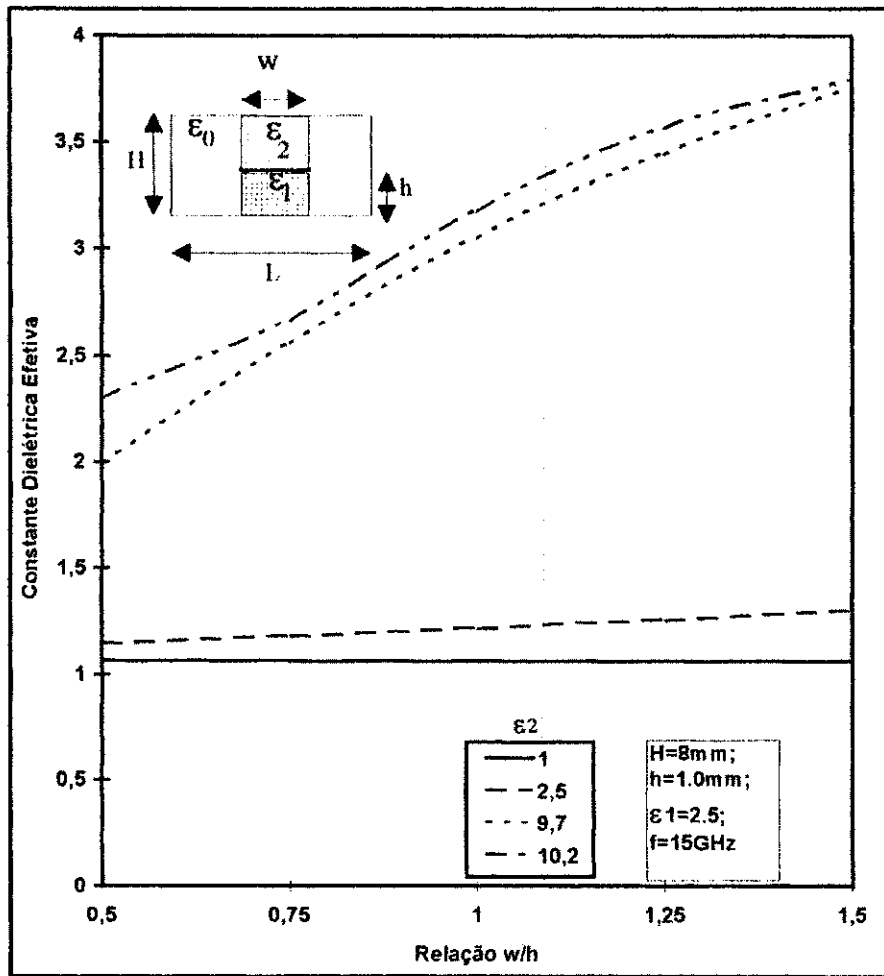


Figura 4.8: Estrutura proposta: covered microstrip-like lines

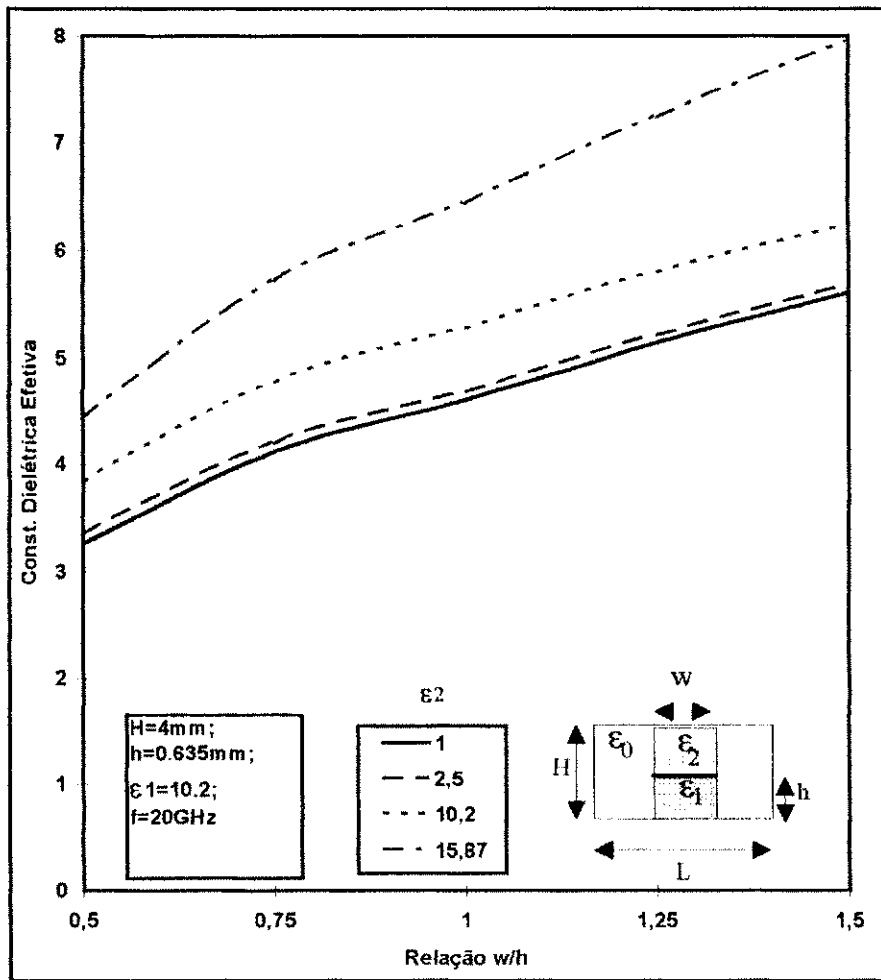


Figura 4.9: Estrutura proposta: covered microstrip-like lines

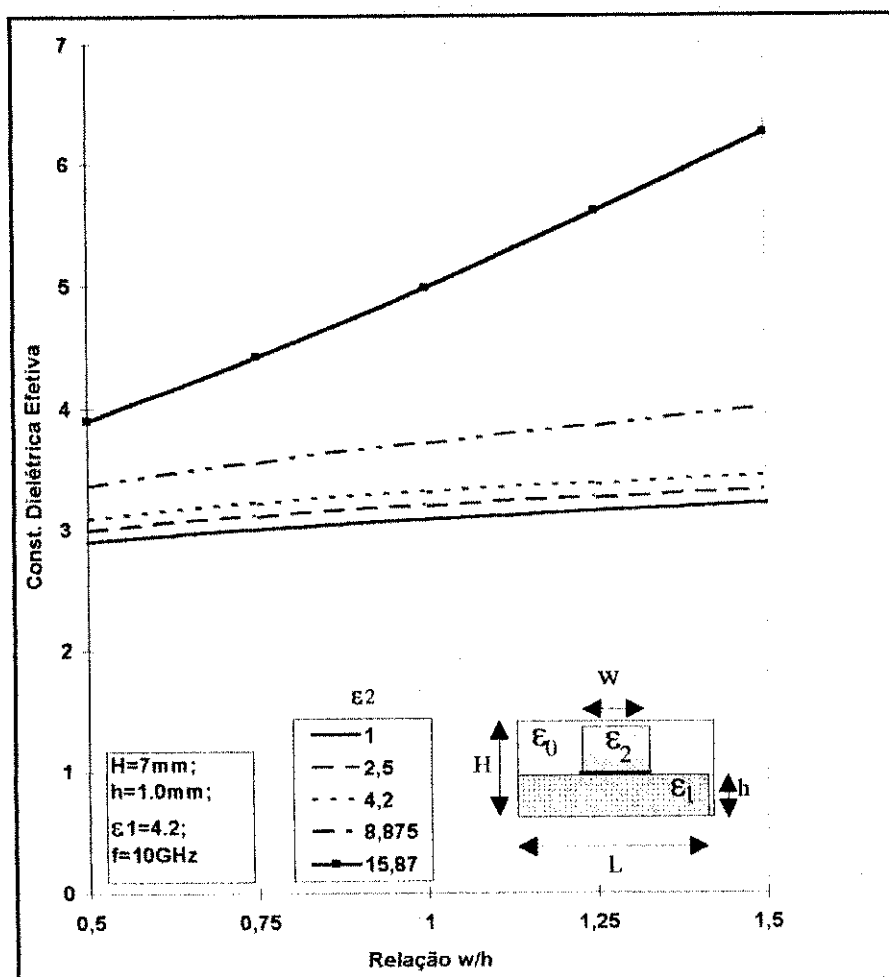


Figura 4.10: Estrutura proposta: covered microstrip-like lines

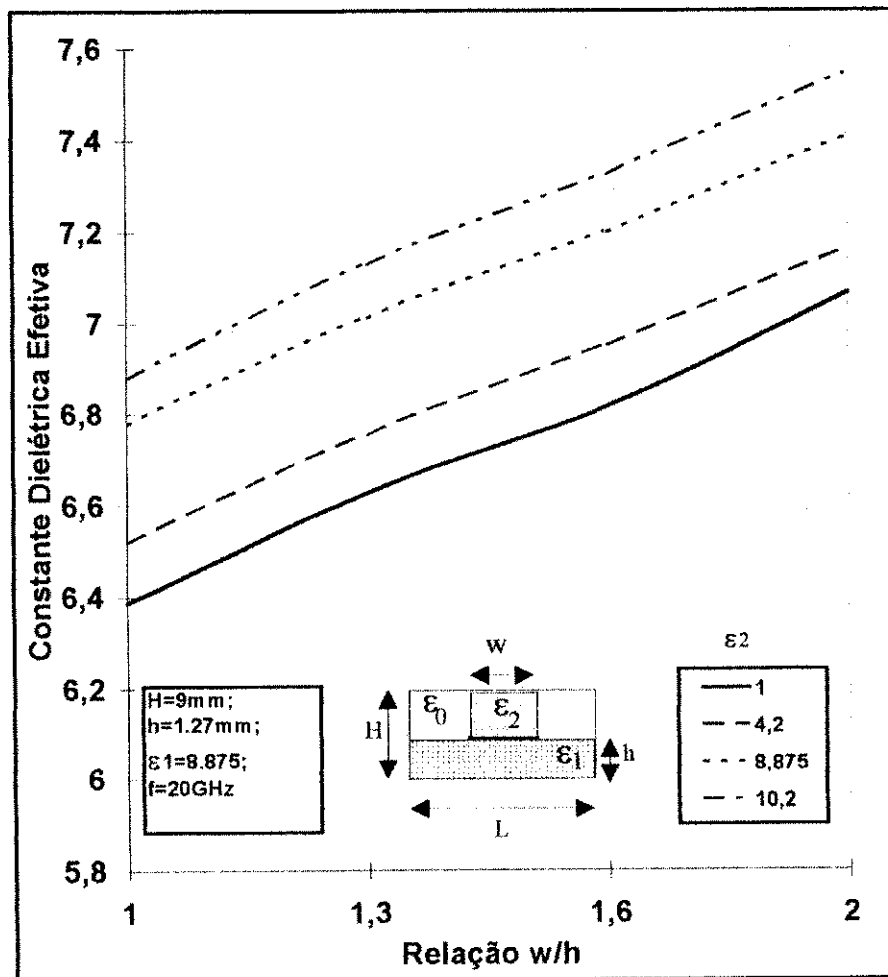


Figura 4.11: Estrutura proposta: covered microstrip-like lines

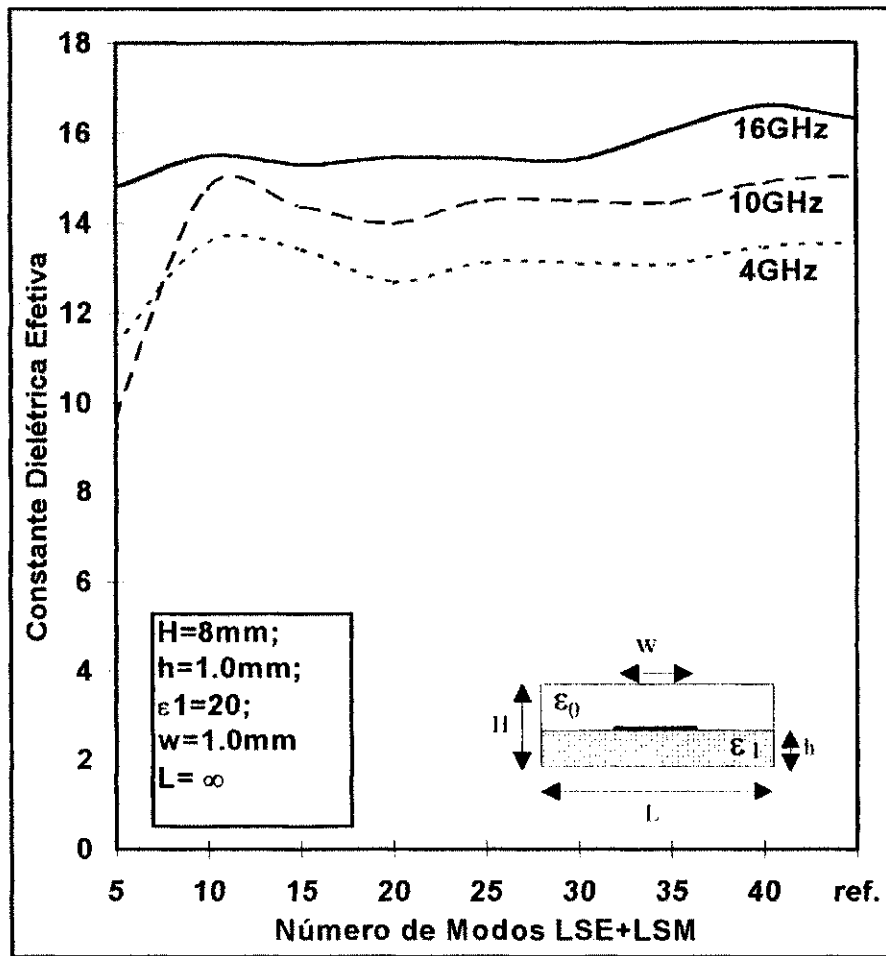


Figura 4.12: Testes de Convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92

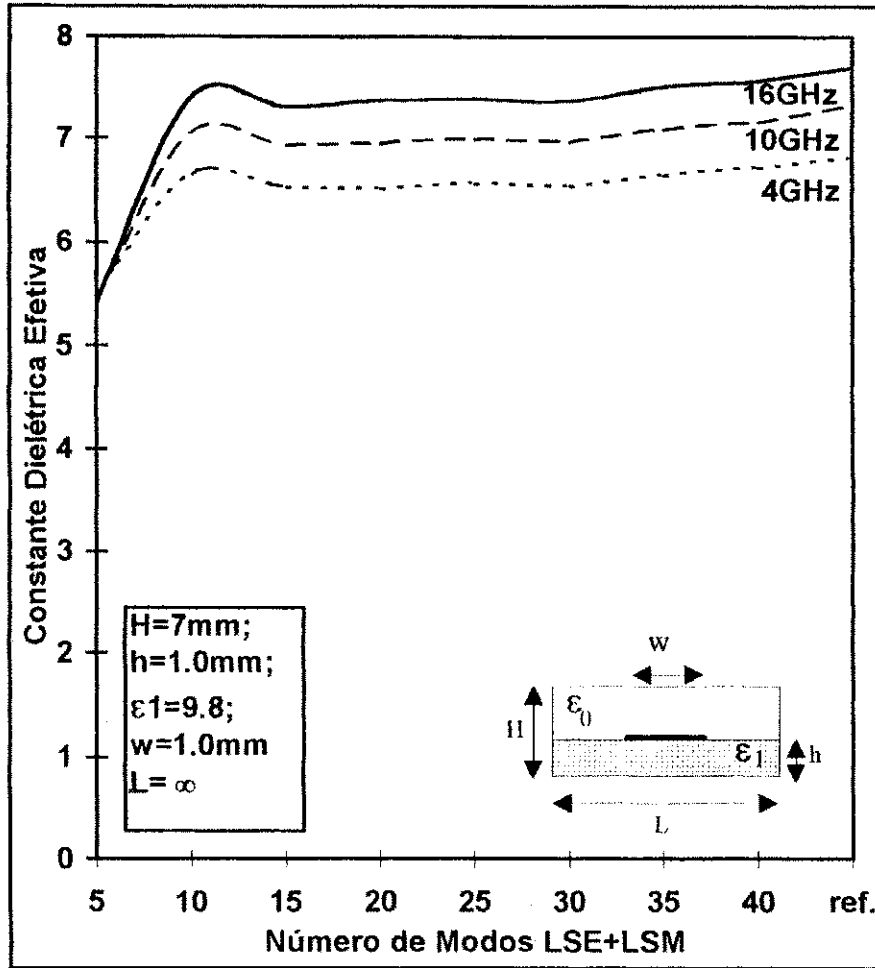


Figura 4.13: Testes de Convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92

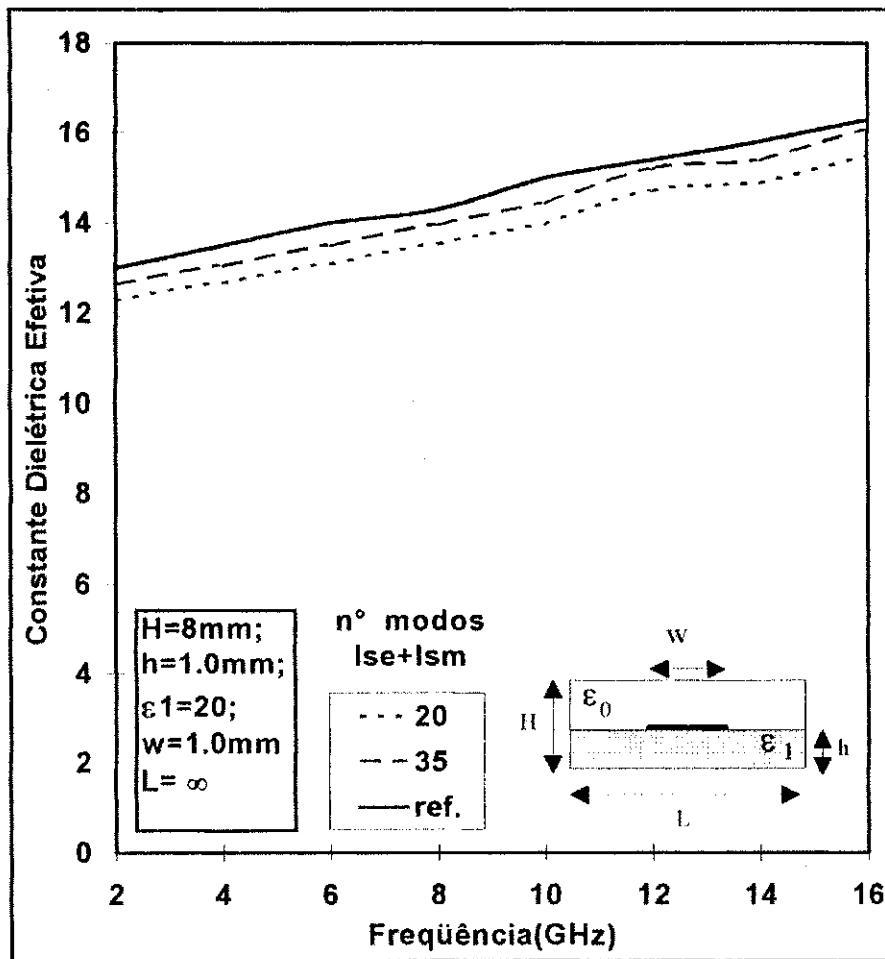


Figura 4.14: Testes de Convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92

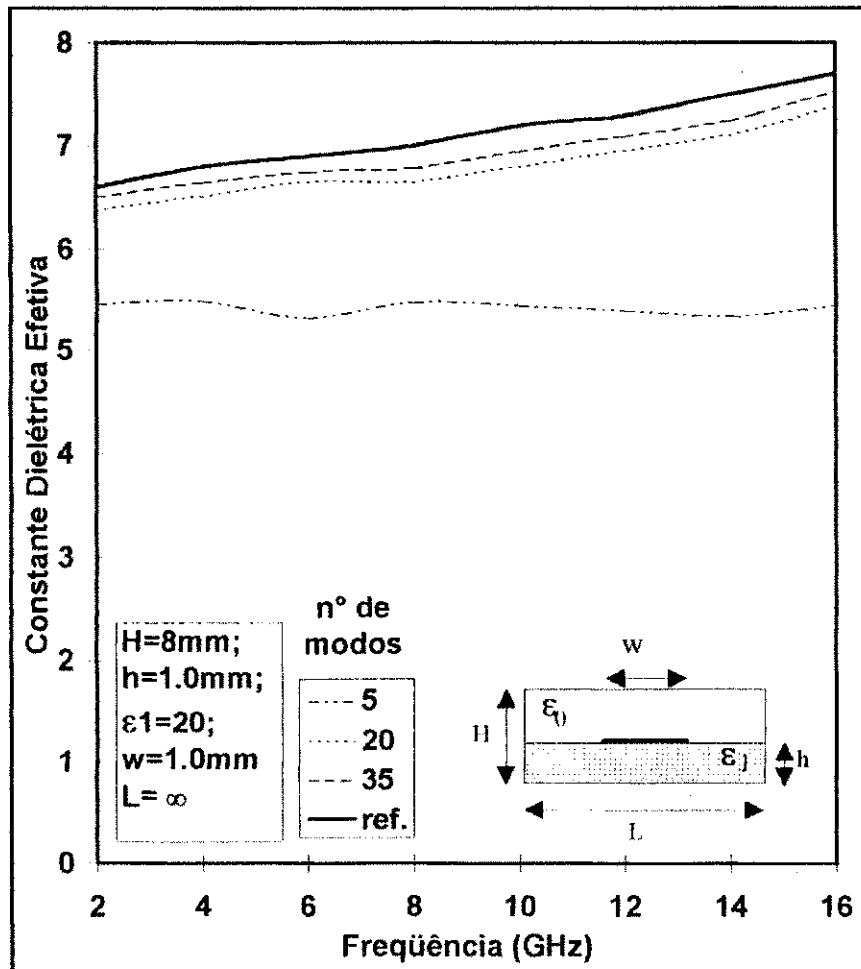


Figura 4.15: Testes de convergência. Ref[28]: J.J.Yang, G.E.Howard and Y.L.Chow - IEEE MTT - 92

Capítulo 5

Conclusão

Nesta dissertação foi apresentada a extensão das aplicações da Técnica da Ressonância Transversa Modificada - MTRT às linhas de microfitas multicamadas segmentadas verticalmente. Para tanto, foi apresentada uma estrutura genérica com múltiplas camadas, na qual foi desenvolvida todo o procedimento teórico do método. Foi apresentado a formulação genérica da técnica e o desenvolvimento das equações para a estrutura em estudo.

Na implementação numérica, foi utilizada a linguagem de programação C++ para plataformas IBM-PC / DOS compatíveis. Através deste programa, foi verificado o comportamento dispersivo de estruturas específicas, através do conhecimento da sua permissividade dielétrica efetiva dependente da frequência. As estruturas específicas apresentadas, ou seja, particularizações do caso genérico, foram determinadas a partir da definição do número de camadas dielétricas em cada subregião e do valor da permissividade dielétrica de cada uma.

Foram analisadas as linhas de microfitas uniformes convencionais e as *covered microstrip*. Também como um caso particular, foi estudado o efeito da largura finita do substrato dielétrico nas linhas de microfita. Finalmente, foram apresentadas algumas estruturas não encontradas na literatura, denominadas de *covered microstrip-like lines*, para verificação da aplicação do método utilizado.

Todos os resultados apresentados, decorrentes das simulações computacionais, obtiveram boa concordância com a literatura especializada, validando assim, a extensão do escopo de aplicação do método.

5.1 Sugestões

Como sugestões para a continuidade deste trabalho, propõe-se:

- a) aplicação do método às linhas de microfita multicamadas segmentadas horizontalmente (figura 5.1). Vale salientar que para este caso, há bastante literatura relacionada disponível;
- b) estudo de perdas no substrato dielétrico e no condutor;
- c) análise do efeito da inclusão de materiais anisotrópicos como substratos;
- d) aplicação do método em slotlines multicamadas segmentadas verticalmente.

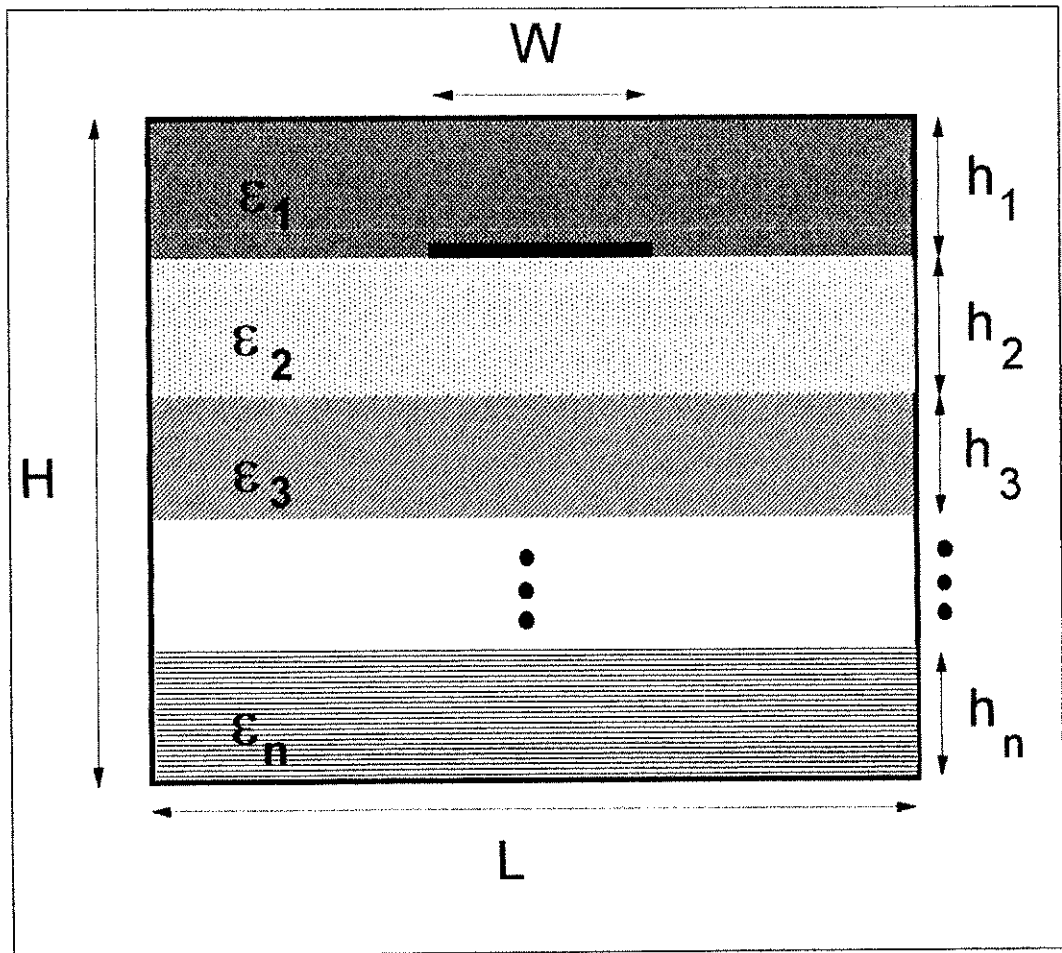


Figura 5.1: Linha de microfita multicamada segmentada horizontalmente

Referências

- [1] Alfredo Gomes Neto. Uma formulação alternativa para a técnica da ressonância transversa. Tese de Doutorado. UFPB - DEE - COPELE, Dezembro 1995.
- [2] J.-D. Tseng and C.-K. C. Tzuang. Effect of finite substrate width on higher-order mode generation of electrically shielded symmetric microstrip. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 28(2):192–193, January 1992.
- [3] Yang and Shafai. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 42(1), January 1994.
- [4] Agoston Agoston Michael Thorburn and Vijai K. Tripathi. Computation of frequency-dependent propagation characteristics of microstriplike propagation structures with discontinuous layers. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 38(2):148–153, February 1990.
- [5] A. Rong and S. Li. Frequency dependent transmission characteristics of microstrip lines on the finite width substrate or near a substrate edge. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 26(12):782–783, June 1990.
- [6] E. Korolkiewicz P. Lowes and S. Scott. Frequency-dependent permittivity values of multilayer microstrip structures using quasistatic modelling. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 31(8):659–660, April 1995.
- [7] R.B. Keam and W.S. Holmes. Spectral-domain analysis of microstrip transmission line covered with lossy dielectric. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 31(16):1354–1355, August 1995.

- [8] C.-N. Chang and J.-F. Cheng. Fullwave analysis of multilayer microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 141(3):185–188, June 1994.
- [9] Nirod K. Das and David M. Pozar. A generalized spectral-domain green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, MTT-35(3):326–335, March 1987.
- [10] Jonh A. Seeger. *Microwave Theory, Components, and Devices*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [11] F. E. Gardiol. Design and layout of microstrip structures. *IEE Proceedings*, 135, 1988.
- [12] T. C. Edwards. *Foundations for Microstrip Circuit Design*. Jonh Wiley and Sons, New Delhi, 1987.
- [13] Tatsuo Itoh. *Numerical Techniques for Microwave and Milimeter-Wave Passive Structures*. Jonh Wiley and Sons Inc., New York, 1989.
- [14] Ramesh Garg K.C. Gupta and I.J. Bahl. *Microstrip Lines and Solllines*. Artech House, Inc, Norwood, Massachussets, 1979.
- [15] R. Sorrentino. *Transverse Resonance Technique in "Numerical Techniques for Microwave and Milimeter-Wave Passive Structures" - Cap. 15*. Jonh Wiley and Sons Inc., New York, 1989.
- [16] Jens Bornemann and Fritz Arndt. Calculating the characteristic impedance of finlines by transverse resonance method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-34(1):85–92, January 1986.
- [17] Roberto Sorrentino and Tatsuo Itoh. Transverse resonance analysis of finline discontinuities. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, MTT-32(12):1633–1638, December 1984.

- [18] G.X. Chang. Transverse resonance method for analysing finlines. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 25(9):599–600, April 1989.
- [19] R. Ratovondrahanta J.-W. Tao, J. Atechian and H. Baudrand. Transverse operator study of a large class of multielectric waveguides. *IEE Proceedings*, 137(5):311–317, October 1990.
- [20] R.F. Harrington. *Field Computation by Moment Methods*. Robert Krieger, Malabar, 1968.
- [21] J. J. H. Wang. Generalised moment methods in eletromagnetics. *IEE Proceedings*, 137(2):127–132, April 1990.
- [22] N.V. Kopchenova and I.A. Maron. *Computational Mathematics*. Mir Publishers, Moscow, 1987.
- [23] Jonh Berry. *The Waite Group's: Programando em C++ (Unix e MS-DOS)*. McGraw-Hill, Ltda, S. Paulo, 1991.
- [24] Brian Flamig. *Turbo C++*. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1992.
- [25] Setrag Koshafian and Razmik Abnons. *Object orientation: concepts, languages, databases, user interfaces*. Jonh Wiley adn Sons, Inc, New York, 1990.
- [26] Hebert Schildt. *C Avançado: guia do usuário*. McGraw-Hill, Ltda, S. Paulo, 1989.
- [27] P.J. Plauger and Jim Brodie. *Standard C: Guia de referência básica*. Microsoft Press/ Makron Books, S. Paulo, 1991.
- [28] Gregory E. Howard Jin Jun Yang and Y. Leonard Chow. A simple technique for calculating the propagation dispersion of multiconductor transmission lines in multilayer dielectric media. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 40:622–627, April 1992.

- [29] Tatsuo Itoh and Raj Mitra. Spectral-domain approach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, pages 496–499, July 1973.
- [30] Manuel Horno Francisco Medina and Henri Baudrand. Generalized spectral analysis of planar lines on layered media including uniaxial and biaxial dielectric substrates. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 37(3):504–511, March 1989.

FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO:
APLICAÇÕES PRÁTICAS

AILSON DE SOUZA BARBOSA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/12/95

WELLINGTON SANTOS MOTA
(Orientador, DEE/UFPB)

WASHINGTON EVANGELISTA DE MACÊDO
(Orientador, DEE/UFPB)

MISAEL DE MORAIS
(Componente da Banca, DEE/UFPB)

MANOEL FIRMINO
(Componente da Banca, DEE/UFRN)

CAMPINA GRANDE
DEZEMBRO - 1995

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Agerson e Luiza, e demais familiares pelo apoio recebido em todos os momentos de minha vida.

A minha esposa Eliana e filhos Vinícius e Raíssa pela paciência e compreensão dispensadas.

Aos Professores Washington Macêdo e Wellington Mota pela orientação desenvolvida neste trabalho.

Ao Engenheiro José de Aracoeli, da SAELPA, pela revisão do texto.

Aos Engenheiros João Viana, Manoel Messias e Natan Pinto pela importante participação no Projeto de Cooperação SAELPA/UFPB/ATECEL na dinamização dos aplicativos utilizados.

Aos Engenheiros e Técnicos da SAELPA e demais colegas e amigos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho analisa os principais aspectos práticos sobre a utilização de programas de Fluxo de Potência para simulação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Avalia o desempenho dos métodos Desacoplado Rápido, Desacoplado Rápido com a aplicação da Técnica Rotação de Eixos e Soma de Potências para aplicações nestes sistemas. Desenvolve um procedimento para facilitar o processo de montagem dos arquivos de dados de forma rápida e confiável. Analisa também a repercussão da modelagem de carga sobre os resultados da simulação. E finalmente, desenvolve procedimentos para apresentação dos resultados da simulação, visando facilitar o processo de análise por parte do usuário. Para as aplicações, foram utilizados sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica da região Norte-Nordeste.

ABSTRACT

This work analyze the principal aspects on utilization of Electric Energy Distribution System simulation programs. It evaluate the performance of Rapid Uncoupled, Rapid Uncoupled with Axis Rotating and Power Summation techniques for application in these systems. It develops a procedure to facilitate data files elaboration in fast and reliable way. It also analyze the load model repercussion on the simulation results. Finally, it develops procedures to present simulation results in order to facilitate the analysis process by users. North and north-east distribution system was used for application purposes.

SUMÁRIO

CAPÍTULO	PÁGINA
1- INTRODUÇÃO	
1.1- Considerações Gerais	1
1.2 - Histórico	3
1.3 - Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição	6
1.3.1 - Método da Escada ("Ladder")	6
1.3.2 - Método de Soma de Correntes	8
1.3.3 - Método de Soma de Potências	9
1.3.4 - Método Desacoplado Rápido	11
1.4 - Modelagem de Carga	15
1.5 - Levantamento de Dados	16
1.6 - Objetivos do Trabalho	17
1.7 - Organização dos Capítulos	17
2 - FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO COM ROTAÇÃO DE EIXOS	
2.1 - Introdução	19
2.2 - Rotação de Eixos	19
2.3 - Desempenho do método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos	23
3 - MÉTODO DE SOMA DE POTÊNCIAS	
3.1 - Introdução	26
3.2 - Método da Soma de Potências	26
3.3 - Desempenho do Método Soma de Potências	32

CAPÍTULO	PÁGINA
4 - LEVANTAMENTO DE DADOS	
4.1 - Introdução	34
4.2 - Procedimento Atual	35
4.2.1 - Dados de Entrada	35
4.2.1.1 - Dados Gerais do Sistema	35
4.2.1.2 - Dados de Linha	36
4.2.1.3 - Dados de Barra	36
4.2.2 - Formação dos Dados de Barra	37
4.3 - Procedimento Utilizado	40
5 - MODELAGEM DE CARGA	
5.1- Introdução	49
5.2 - Considerações Básicas	50
5.3 - Modelos Simplificados de Cargas Elementares	51
5.3.1 - Impedância Constante	52
5.3.2 - Potência Constante	53
5.3.3 - Corrente Constante	53
5.4 - Modelo Exponencial	54
5.5 - Modelo Polinomial	56
5.6 - Relação entre Demanda e Tensão em Cargas Compostas - Experiência do Electric Power Research Institute - EPRI	60
5.6.1 - Apresentação do Sistema.....	61
5.6.2 - Resultados	62
5.7 - Modelos Utilizados	65

CAPÍTULO	PÁGINA
6 - APLICAÇÕES	
6.1- Introdução	66
6.2 - Etapas do Processo	66
6.2.1 - Aplicação do Programa Montador	66
6.2.2 - Aplicação do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos	72
6.2.3 - Aplicação da Modelagem de Carga	75
7 - CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	81
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	85
ANEXO I	88
ANEXO II	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1.1 - Sistema radial com duas linhas	6
Figura 2.1 - Representação de uma impedância Z em dois eixos	20
Figura 2.2 - Algoritmo básico do método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos	23
Figura 2.3 - Aplicação da técnica Rotação de Eixos ao método Desacoplado Rápido	25
Figura 3.1 - Trecho de um SDEE	26
Figura 3.2 - Circuito monofásico equivalente de um trecho de um SDEE	27
Figura 3.3 - Fluxograma do método Soma de Potências	32
Figura 4.1 - Tela principal do programa montador	42
Figura 4.2 - Informações sobre os arquivos	43
Figura 4.3 - Informações gerais	44
Figura 4.4 - Dados dos casos	45
Figura 4.5 - Curva de carga média mensal (dia útil) típica de um alimentador de distribuição do interior do Estado da Paraíba ..	45
Figura 4.6 - Dados de linha e transformador	46
Figura 4.7 - Dados de linha (detalhe do código do tipo de cabo)	46
Figura 4.8 - Dadas de barra	47
Figura 4.9 - Tela para apoiar a formação do arquivo de dados para traçar o diagrama unifilar da rede	48
Figura 5.1- Gráfico representativo de Modelos Exponenciais de Carga variando com a tensão	55
Figura 5.2 - Gráfico representativo de Modelos de Cargas Elementares variando com a tensão	57

FIGURA	PÁGINA
Figura 5.3 - Demanda (kW) média diária do alimentador residencial Berge considerando a média anual	62
Figura 5.4 - Demanda (kvar) média diária do alimentador residencial Berge considerando a média anual	62
Figura 6.1 - Diagrama unifilar do alimentador 01L1 da SE Jatobá	67
Figura 6.2 - Diagrama de barras do alimentador 01L1 da SE Jatobá	68
Figura 6.3 - Dados gerados a partir do programa Monta	71
Figura 6.4 - Arquivo de dados ajustados - L1JTB.NEW	73
Figura 6.5 - Resultado do perfil de tensão do alimentador 01L1 da SE Jatobá	74
Figura 6.6 - Perdas ativas do alimentador 01L1_JTB	74
Figura 6.7 - Perfil de tensão para os casos apresentados na tabela 6.3	77
Figura 6.8 - Exemplo de valores de tensão encontrados na rede de distribuição de Jacaraú	77
Figura 6.9 - Perdas ativas versus tipo de carga - 01L1_JTB	78

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
Tabela 1.1- Relações R/X para cabos utilizados nas redes de distribuição .	3
Tabela 2.1 - Desempenho dos métodos DR e DRR	24
Tabela 3.1 - Desempenho dos métodos DR, DRR e SP	33
Tabela 5.1 - Cargas Elementares	55
Tabela 5.2 - Características básicas dos alimentadores utilizados no estudo	61
Tabela 5.3 - Variação média anual das potências ativa e reativa com relação à variação de tensão e percentuais relativos a representação da carga	63
Tabela 5.4 - Valores máximos e mínimos da variação das potências ativa e reativa com relação à variação da tensão aplicada	64
Tabela 5.5 - Valores médios da variação anual das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão e percentuais relativos à representação da carga.	64
Tabela 5.6 - Modelagem de carga usada no trabalho	65
Tabela 6.1 - Composição dos dados de barra	69
Tabela 6.2 - Fatores de Diversidade e de Utilização	70
Tabela 6.3 - Resultado da aplicação da modelagem de carga - 01L1_DIN ...	76

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

O uso do computador digital para a simulação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - SDEEs é uma das atividades mais utilizadas nas empresas de energia elétrica. Dentre os programas em uso nas empresas, o fluxo de potência é uma das ferramentas mais comuns nas áreas de planejamento e operação de sistemas.

Os estudos de fluxo de potência são utilizados nas fases de projeto, planejamento da expansão, planejamento da operação e operação propriamente dita dos sistemas, podendo ser utilizados apenas para análise da rede ou integrar estudos mais complexos, como os de otimização, estabilidade, controle e supervisão.

Existem diversos métodos de fluxo de potência atualmente disponíveis para sistemas de transmissão, algum dos quais de uso bastante amplo, tais como: os métodos de Gauss-Seidel, Newton Raphson e Desacoplado Rápido. Estes métodos foram desenvolvidos inicialmente para sistemas de transmissão, porém quando aplicados a sistemas de distribuição apresentam problemas de convergência, causados pelo mal condicionamento de matrizes, porque os sistemas de distribuição apresentam características específicas, tais como:

- Configuração predominantemente radial;
- Alta relação R/X.

Os sistemas elétricos de distribuição da região Norte-Nordeste, predominantemente, apresentam alimentadores com uma configuração radial e nível de tensão em 13.8 kV. A maioria dos alimentadores, normalmente possuem chaves de interligação em aberto, a fim de efetuar transferências de carga, em condições de emergência. Três importantes características são observadas: os alimentadores urbanos, geralmente, não apresentam problemas durante o processo de simulação, devido à utilização de cabos com seção transversal maior, comprimento reduzido e carregamento relativamente elevado. Alguns alimentadores rurais e interurbanos (alimentadores que atendem a várias cidades e/ou outras aglomerações populacionais) apresentam problemas durante o processo de simulação, devido à utilização de cabos com uma seção transversal menor, comprimento demasiadamente elevado e carregamento relativamente baixo.

Na tabela 1.1 a seguir, são apresentadas as relações R/X para alguns cabos utilizados nas redes de distribuição da região Norte-Nordeste.

A utilização de métodos desenvolvidos considerando as características específicas dos SDEEs, resultou em programas de fluxo de potência que apresentam um excelente desempenho quando utilizados para simulação destes sistemas. Atualmente os principais métodos existentes para simulação dos SDEEs são: o método da Escada ("Ladder"), o método da Soma de Correntes, o método da Soma de Potências e o método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixo.

Tabela 1.1- Relações R/X para cabos utilizados nas redes de distribuição da região Norte-Nordeste

TIPO	BITOLA	R/X
C O B R E	6 AWG	3,12
	a	a
	300 MCM	0,33
C A A	4 AWG	3,20
	a	a
	336,4 MCM	0,51

1.2 - Histórico

A escolha de um método de solução de fluxo de potência para aplicações práticas não é uma tarefa fácil, porque requer uma análise cuidadosa das vantagens e desvantagens dos vários métodos disponíveis [21], no que diz respeito às características de armazenamento, velocidade e confiabilidade, em relação à aplicação prática em questão e às facilidades computacionais. A dificuldade da escolha ocorre devido ao fato que nenhum método reúne todas as características desejadas.

Até o ano de 1961, os métodos de fluxo de potência eram todos iterativos e se baseavam principalmente em métodos de deslocamentos sucessivos, dentre os quais se destacou o método de Gauss-Seidel. Este método, de simples programação, reduzido números de cálculos e pequeno requisito de memória, apresenta sérios problemas de convergência quando da presença, na rede elétrica, de reatâncias série negativas não compensadas pelas reatâncias positivas das linhas, ou quando da ocorrência de impedâncias muito diferentes terminando em uma mesma barra [25]. O chamado "Método de Eliminação para Solução de

Fluxo de Potência" [27], que era a aplicação de uma versão do método de Newton-Raphson à solução das equações não lineares de fluxo de potência, resolveu os problemas que ocorriam no método de Gauss-Seidel.

Este método além de resolver os problemas que o de Gauss-Seidel não resolvia, era superior para sistemas de pequeno porte. Entretanto, os requisitos de memória e o tempo de computação cresciam rapidamente com o tamanho do sistema, limitando portanto o método para sistemas de grande porte.

A determinação de uma sequência de operações que minimizasse os requisitos de memória e o tempo de computação necessários à solução de equações simultâneas, baseadas na matriz admitância ou similar, e à preservação dos operadores e da sequência de operações para uso em soluções repetidas, foram duas idéias introduzidas [3,16], quando foi notado que as dificuldades ocorriam, não devido ao método de Newton-Raphson em si, mas sim no método numérico de resolução do sistema de equações lineares associado.

O método Newton-Raphson foi então consagrado [18,25] mesmo sendo menos econômico que o de Gauss-Seidel para pequenos sistemas e menos rápido que métodos existentes para soluções repetidas.

Baseados na necessidade de se utilizar métodos numéricos eficientes que levem em conta as características físicas do sistema [5,10,22,23,24,26] e baseado no desacoplamento existente entre os fluxos de potências ativa (MW) e reativa (Mvar) em um sistema de potência [11,13], B. Stott e O. Alsac formularam, através de extensivo estudo numérico, um método [20] mais simples, rápido e mais confiável que o de Newton-Raphson.

O método é atrativo para problemas "on-line" e "off-line", solução aproximada ou exata, e para análise de contingências estáticas de qualquer tamanho. Tem requisitos 40% menores de armazenamento na memória do que o

de Newton-Raphson, e usando um pequeno número de transferências memória-disco, os requisitos de memória são similares aqueles de Gauss-Seidel. A velocidade de iteração neste método Desacoplado Rápido é igual a dois terços da velocidade de iteração do método de Gauss-Seidel ou cinco vezes a velocidade de iteração do método de Newton-Raphson. O número de iterações requerido para a solução é ligeiramente maior do que o requerido pelo método de Newton-Raphson, porque este é um método quase-exato de convergência quadrática, enquanto que o método Desacoplado Rápido é um método aproximado de convergência geométrica [20].

* O método Desacoplado Rápido é atualmente o mais popular método de fluxo de potência aplicado na simulação de sistemas elétricos de potência. Ele trabalha muito bem em sistemas que apresentam baixa relação R/X, mas tem dificuldades de convergência em sistemas com alta relação R/X [28].

** Modificações na versão original do método Desacoplado Rápido para evitar tais dificuldades têm sido de interesse para investigações [15].

*** Métodos de Compensação Série [6] e Paralela [4] são um caminho para se tratar com problemas de convergência causados pela alta relação R/X no método Desacoplado Rápido. Estes métodos de Compensação, entretanto, não apresentam confiabilidade tão boa quanto à esperada.

A técnica especial denominada Rotação de Eixos [8], permite diminuir artificialmente a relação R/X dos sistemas elétricos de potência. Esta técnica mostrou-se bastante eficiente para estudos dos sistemas de distribuição.

**** Diante da necessidade de métodos de solução de fluxo de potência que aliem uma alta velocidade e confiabilidade, surgiram os métodos que levam em conta as características específicas dos SDEEs, e portanto, apresentam um excelente desempenho quando utilizados para simulação destes sistemas.

Surgiram então, o método da Escada ("Ladder") [12], o método de Soma de Correntes [17] e o método de Soma de Potências [1]. Estudos comparativos mostraram que o método de Soma de Potências apresenta-se como a melhor alternativa, por sua velocidade e confiabilidade, mesmo em sistemas muito carregados [2].

1.3 - Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição

Esta seção apresenta uma breve descrição dos principais métodos utilizados para simulação dos SDEEs.

A figura 1.1 que apresenta o diagrama de um sistema simples será utilizada para ilustrar o desenvolvimento das equações básicas de cada método.

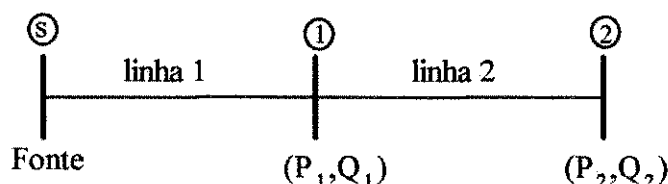


Figura 1.1 - Sistema radial com duas linhas

1.3.1 - Método da Escada ("Ladder")

Este método da Escada ou método de "Ladder" [12], utiliza um procedimento que consiste em calcular as tensões nodais, percorrendo o sistema de forma inversa (partindo-se do nó terminal em direção ao nó fonte), adicionando-se as quedas de tensão dos ramos, até se obter o valor da tensão da fonte.

Começando com uma estimativa inicial de $\bar{V}_{2(0)}$ (isto é $k = 0$) as seguintes equações são obtidas:

$$\bar{I}_{2(k)} = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_{2(k)}} \quad (1.1)$$

$$\bar{V}_{1(k)} = \bar{V}_{2(k)} + \bar{Z}_2 \bar{I}_{2(k)} \quad (1.2)$$

$$\bar{I}_{1(k)} = (\bar{S}_1 / \bar{V}_{1(k)})^* + \bar{I}_{2(k)} \quad (1.3)$$

$$\bar{V}_{s(k)} = \bar{V}_{1(k)} + \bar{Z}_1 \bar{I}_{1(k)} \quad (1.4)$$

$$\bar{V}_{\text{erro}(k)} = \bar{V}_s - \bar{V}_{s(k)} \quad (1.5)$$

$$\bar{V}_{2(k+1)} = \bar{V}_{2(k)} + \bar{V}_{\text{erro}(k)} \quad (1.6)$$

onde:

\bar{V}_s : fasor tensão da fonte;

\bar{V}_i : fasor tensão do nó i;

k : número da iteração;

\bar{I}_i : fasor corrente na linha i;

$\bar{S}_i = P_i + Q_i$: carga complexa conectada no final da linha i;

$\bar{Z}_i = R_i + X_i$: impedância complexa da linha i;

P_{pi} : perdas ativas na linha i;

P_{qi} : perdas reativas na linha i.

Após cada iteração k é testada a convergência do processo, calculando-se o erro $\bar{V}_{\text{erro}(k)}$, através da equação (1.5). Se existirem ramais no circuito em estudo, serão realizadas sub-iterações em cada ramal a partir de cada iteração principal.

1.3.2 - Método de Soma de Correntes

O método de Soma de Correntes [17], utiliza um procedimento que consiste em somar as correntes em cada nó, percorrendo o sistema de forma inversa. Usando a figura 1.1 e começando com uma estimativa inicial para toda as tensões ($k = 0$) as correntes das linhas são calculadas da seguinte forma:

$$\bar{I}_{2(k)} = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_{2(k)}^*} \quad (1.7)$$

$$\bar{I}_{1(k)} = (\bar{S}_1^* / \bar{V}_{1(k)}^*) + \bar{I}_{2(k)} \quad (1.8)$$

Neste momento, as tensões dos nós são calculadas através do caminho direto, ou seja, partindo-se do nó fonte caminha-se na direção do nó terminal, portanto:

$$\bar{V}_{1(k+1)} = \bar{V}_s - \bar{Z}_1 \bar{I}_{1(k)} \quad (1.9)$$

$$\bar{V}_{2(k+1)} = \bar{V}_{1(k+1)} - \bar{Z}_2 \bar{I}_{2(k)} \quad (1.10)$$

A convergência é obtida quando para cada barra é satisfeita a condição a seguir:

$$|\bar{V}_{i(k+1)} - \bar{V}_{i(k)}| \leq \varepsilon \quad (1.11)$$

onde:

ε : tolerância de tensão.

1.3.3 - Método de Soma de Potências

O método de Soma de Potências [1], utiliza uma sistemática que percorre o sistema de forma direta e inversa. As cargas e as perdas são somadas no caminho inverso, ou seja, partindo na direção da barra terminal e terminando na barra fonte, enquanto que as tensões nodais são calculadas através de equação biquadrada, usando o caminho direto, ou seja, partindo na direção da barra fonte e terminando na barra terminal, tomadas duas a duas.

Inicialmente, usando o caminho inverso, determina-se a potência equivalente para cada barra somando as potências referentes às cargas, incluindo a própria carga e as perdas de potência da linha que estão depois da barra de interesse, concentrando o resultado nesta barra. Na primeira iteração as perdas não são levadas em consideração.

Em seguida, usando o caminho direto, inicia-se o cálculo das tensões através das equações (1.12) e (1.13) tomando as barras duas a duas, conforme sistema da figura 1.1.

$$V_{1(0)}^4 + V_{1(0)}^2 \{ 2[(P_1 + P_2)R_1 + (Q_1 + Q_2)X_1] - V_s^2 \} + [(P_1 + P_2)^2 + (Q_1 + Q_2)^2](Z_1^2) = 0 \quad (1.12)$$

$$V_{2(0)}^4 + V_{2(0)}^2 [2(P_2R_2 + Q_2X_2) - V_{1(0)}^2] + (P_2^2 + Q_2^2)(Z_2^2) = 0 \quad (1.13)$$

A solução das equações biquadradas em $V_{1(0)}^2$ e $V_{2(0)}^2$ é facilmente obtida.

Usando o caminho inverso, as potências são somadas como segue durante a iteração k . Neste caso as perdas são calculadas conforme as equações (1.14) e (1.15).

$$P_{p2(k)} = R_2 \frac{(P_2^2 + Q_2^2)}{V_{2(k)}^2} \quad (1.14)$$

$$P_{q2(k)} = X_2 \frac{(P_2^2 + Q_2^2)}{V_{2(k)}^2} \quad (1.15)$$

$$A_{(k)} = P_1 + P_2 + P_{p2(k)} \quad (1.16)$$

$$B_{(k)} = Q_1 + Q_2 + P_{q2(k)} \quad (1.17)$$

Durante o caminho direto, as novas tensões nodais são calculadas conforme equações (1.18) e (1.19).

$$V_{1(k)}^4 + V_{1(k)}^2 [2(A_k R_1 + A_k X_1) - V_s^2] + (A_{(k)}^2 + B_{(k)}^2) Z_1^2 = 0 \quad (1.18)$$

$$V_{2(k)}^4 + V_{2(k)}^2 [2(P_2 R_2 + Q_2 X_2) - V_{1(k)}^2] + (P_2^2 + Q_2^2) (Z_2^2) = 0 \quad (1.19)$$

A convergência é obtida quando para cada barra é satisfeita a condição da equação (1.11).

1.3.4 - Método Desacoplado Rápido

O bem conhecido método de Newton-Raphson [25], na sua forma polar e usando a tolerância de aproximação em potência, é tomado como conveniente e significativo ponto de partida para a derivação do algoritmo base.

O método de Newton-Raphson é uma aplicação formal de um algoritmo geral para a solução de equações não lineares e constitui-se de soluções sucessivas do sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V / V \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \text{ é a matriz Jacobiana do sistema.}$$

Seus elementos são definidos como:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} \quad ; \quad N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \cdot V_m$$

$$J_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \quad ; \quad L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \cdot V_m$$

O primeiro passo da aplicação do princípio do desacoplamento P- θ /Q-V é desprezar o acoplamento das submatrizes [N] e [J] na equação (1.20), resultando em duas equações separadas.

$$[\Delta P] = [H] [\Delta \theta] \quad (1.21)$$

$$[\Delta Q] = [L] [\Delta V / V] \quad (1.22)$$

onde:

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = - B_{kk} V_k^2 - Q_k$$

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$

$$L_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} V_k = - B_{kk} V_k^2 + Q_k$$

$$L_{km} = H_{km}$$

As equações (1.21) e (1.22) podem ser resolvidas alternadamente como no método de Newton Desacoplado [19], reavaliando e retriangularizando [H] e [L] a cada iteração.

As seguintes simplificações fisicamente justificáveis e quase sempre observáveis na prática para sistemas de potência podem ser feitas:

$$\cos \theta_{km} \cong 1$$

$$G_{km} \sin \theta_{km} \ll B_{km}$$

$$Q_k \ll B_{kk} V_k^2$$

Então:

$$H'_{km} = L'_{km} = - V_k V_m B_{km}$$

$$H'_{kk} = L'_{kk} = - V_k^2 B_{kk}$$

de modo que boas aproximações para as equações (1.21) e (1.22) são:

$$[\Delta P] = [H'] [\Delta \theta] \quad \text{ou} \quad [\Delta P] = [V \cdot B' \cdot V] [\Delta \theta] \quad (1.23)$$

$$[\Delta Q] = [L'] [\Delta V / V] \quad \text{ou} \quad [\Delta Q] = [V \cdot B'' \cdot V] [\Delta V / V] \quad (1.24)$$

Neste estágio de derivação os elementos da matriz $[B']$ e $[B'']$ são estritamente elementos da matriz $[-B]$. O processo de desacoplamento e a forma final do algoritmo são agora completados por:

- Omissão em $[B']$ da representação daqueles elementos da rede que afetam predominantemente o fluxo de reativos, isto é, reatância em paralelo e transformadores com "tap" variável em carga.
- Omissão em $[B'']$ da representação de transformadores defasadores que afetam predominantemente o fluxo de potência ativa.

Neste ponto as matrizes $[B']$ e $[B'']$ já são diferentes entre si, e também diferentes do negativo da parte imaginária da matriz admitância.

Estudos numéricos mostram que melhores resultados são obtidos reescrevendo os sistemas de equação como:

$$[\Delta P / V] = [V \cdot B'] [\Delta \theta] \quad (1.25)$$

$$[\Delta Q / V] = [B''] [\Delta V] \quad (1.26)$$

- Remoção da influência do fluxo de reativos no cálculo de $[\Delta \theta]$ fazendo todas as tensões do lado direito da equação (1.25) iguais a 1,0 pu. Então os sistemas ficam:

$$[\Delta P / V] = [B'] [\Delta \theta] \quad (1.27)$$

$$[\Delta Q / V] = [B''] [\Delta V] \quad (1.28)$$

Experimentalmente observa-se que resultados ligeiramente melhores são obtidos desprezando-se as resistências da rede no cálculo de $[B']$.

As dimensões reduzidas dos sistemas de distribuição em estudo, cujo o número médio de barras é da ordem de 30 barras, permite que a solução do sistema de equações lineares seja obtida através da inversão direta das matrizes $[B']$ e $[B'']$.

As matrizes $[B']$ e $[B'']$ são reais, esparsas e têm as estruturas de $[H]$ e $[L]$, respectivamente. Desde que essas matrizes $[B']$ e $[B'']$ só contenham admitâncias da rede, elas são constantes e precisam ser invertidas somente no início do processo.

O melhor esquema de iteração é resolver $[\Delta P/V] = [B'] [\Delta \theta]$ e $[\Delta Q/V] = [B''] [\Delta V]$ alternadamente, usando sempre os valores de tensão (módulo e ângulo) mais recentes. Cada iteração compreende uma solução $[\Delta \theta]$ usada para atualizar $[\theta]$ e uma solução $[\Delta V]$ usada para atualizar $[V]$. Este procedimento é chamado "esquema (1 θ ,1V)" composto de duas meias-iterações.

Testes separados de convergência são realizados com o critério de parada utilizando tolerância de potência:

$$[\Delta P] \leq C_p \quad e \quad [\Delta Q] \leq C_q \quad (1.30)$$

onde:

$$\Delta P_k^{(h+1)} = P_k^{\text{esp}} - P_k^{\text{cal}(h)} = P_k^{\text{esp}} - R_e \left[V_k^{(h)} \sum_{m \in k} Y_{km}^* \frac{V_m^{(h)}}{V_m} \right] \quad (1.31)$$

$k = 2, \dots, n$

$$\Delta Q_k^{(h+1)} = Q_k^{\text{esp}} - Q_k^{\text{cal}(h)} = Q_k^{\text{esp}} - I_m \left[V_k^{(h)} \sum_{m \in k} Y_{km}^* \frac{V_m^{(h)}}{V_m} \right] \quad (1.32)$$

$k = 2, \dots, \ell$

Cp - tolerância de potência ativa

Cq - tolerância de potência reativa

1.4 - Modelagem de Carga

Nos estudos de fluxo de potência, a modelagem da carga assume um papel importante nos resultados obtidos. Em particular, estes resultados dependem fortemente do fator de potência e da modelagem da carga [9].

Ambos os fatores possuem influência decisiva na qualidade dos resultados, podendo conduzir a valores imprecisos, com prejuízo significativo para o sistema elétrico, à medida que a representação das cargas não condiz com a realidade do estado de regime permanente. Este fato, inclusive, pode levar um determinado método de fluxo de potência a não convergir, à medida que o sistema que se quer analisar apresenta um carregamento demasiado elevado. Na realidade este sistema se encontra em pleno funcionamento.

Por outro lado, a dificuldade inerente à determinação do modelo da carga é um fato, considerando a grande variedade da composição da mesma.

1.5 - Levantamento de Dados

Ao contrário do que ocorre nos sistemas de transmissão, onde os dados são obtidos de maneira simples, ou seja, através de medições operacionais, nos sistemas de distribuição o levantamento de dados representa um problema complexo e trabalhoso, face a:

- Grande quantidade de consumidores;
- Grande quantidade de informações;
- Diversidade de dados;
- Falta de medições operacionais adequadas etc.

Considerando que este aspecto é de grande importância para as áreas de estudo das concessionárias, este trabalho apresenta uma proposta para atenuar os graves problemas decorrentes da formação dos arquivos de dados dos programas de fluxo de potência aplicado aos SDEEs, tornando esta tarefa bastante amigável, rápida e segura para os engenheiros de planejamento e operação.

Esta proposta se concretizou através do desenvolvimento de um programa em linguagem "Clipper" e sua descrição se encontra detalhada no capítulo 4.

Diante deste quadro de dificuldades, aliado ao crescente interesse das concessionárias de energia elétrica em aumentar a eficiência das suas áreas afins, torna-se a distribuição uma área de grande necessidade de investimentos em pesquisa, tanto nas concessionárias de energia elétrica como nas universidades. Este fato irá refletir na melhoria da qualidade dos serviços prestados e na redução dos custos das tarifas para a sociedade.

1.6 - Objetivos do Trabalho

Este trabalho apresenta os resultados de um projeto desenvolvido com os seguintes objetivos:

- Analisar o desempenho dos principais métodos de fluxo de potência usados para simulação de SDEEs;
- Desenvolver procedimentos para facilitar o processo de montagem dos arquivos de dados de forma rápida e confiável;
- Analisar a repercussão da modelagem de carga sobre os resultados do processo de simulação;
- Desenvolver procedimentos para apresentação dos resultados da simulação, visando facilitar o processo de análise por parte do usuário.

1.7 - Organização dos Capítulos

O capítulo 2 apresenta o método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos, bem como o desempenho deste método comparado com o método Desacoplado Rápido convencional.

O capítulo 3 apresenta o método da Soma de Potências, bem como o desempenho deste método comparado com os dois métodos anteriores.

O capítulo 4 apresenta um procedimento para facilitar o processo de montagem dos arquivos de dados para simulação dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - SDEEs.

O capítulo 5 analisa a repercussão da modelagem de carga sobre os resultados do processo de simulação dos SDEEs através de um exemplo real.

O capítulo 6 apresenta, através de um exemplo real, todas as etapas envolvidas no processo de simulação dos SDEEs, utilizando os programas de montagem dos arquivos de dados, fluxo de potência Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos e demais programas auxiliares para análise dos resultados.

O último capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, além de apontar sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

FLUXO DE POTÊNCIA DESACOPLADO RÁPIDO COM ROTAÇÃO DE EIXOS

2.1 - Introdução

Como se sabe, o método Desacoplado Rápido se baseia no desacoplamento P- θ , Q-V (potência ativa - ângulo, potência reativa - tensão) e uma das condições para que esse desacoplamento ocorra é que as relações R/X (resistência/reatância) dos trechos (linhas de transmissão) sejam baixas.

Quando se trata da aplicação do método Desacoplado Rápido em redes de distribuição, cujas relações R/X apresentam valores elevados, o desempenho deste método fica prejudicado (o processo de convergência se torna bem mais lento ou mesmo não converge). Para se conseguir um bom desempenho do método Desacoplado Rápido para redes de distribuição, apresenta-se a seguir uma técnica denominada Rotação de Eixos [8].

2.2 - Rotação de Eixos

Esta técnica consiste, basicamente, em mudar temporariamente o sistema de referência complexo, através de uma rotação dos eixos real e imaginário, de modo que as impedâncias representadas no novo sistema de referência possam ter a relação R/X favorável ao desacoplamento do método Desacoplado Rápido.

Na figura 2.1, tem-se a representação de uma impedância em dois eixos real-imaginário.

No plano (Real, Imag.)

$$Z = R + jX$$

No plano (Real', Imag.')

$$Z' = R' + jX'$$

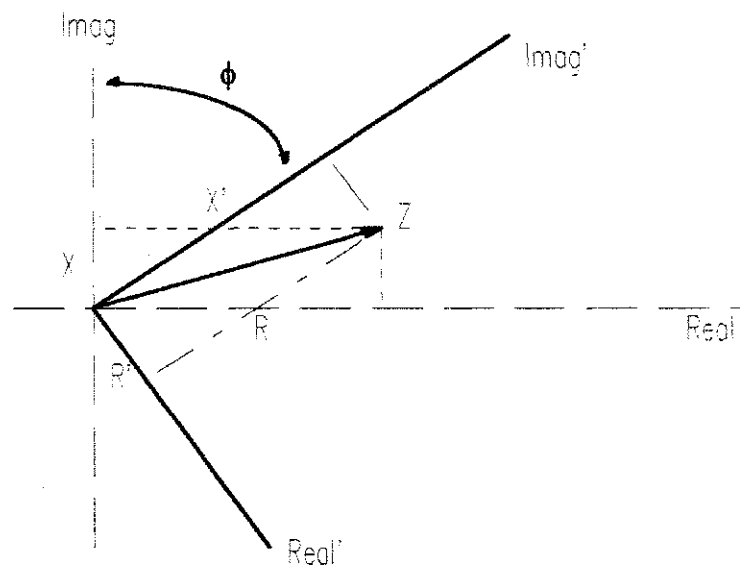


Figura 2.1 - Representação de uma impedância Z em dois eixos.

Como os eixos estão defasados de um ângulo ϕ , tem-se:

$$Z' = Z e^{j\phi} \quad (2.1)$$

$$R' = R \cos \phi - X \sin \phi \quad (2.2)$$

$$X' = R \operatorname{sen} \phi + X \cos \phi \quad (2.3)$$

Desta maneira, a relação R'/X' pode ser expressa por:

$$\frac{R'}{X'} = \frac{R \cos \phi - X \operatorname{sen} \phi}{R \operatorname{sen} \phi + X \cos \phi} \quad (2.4)$$

Variando-se o ângulo ϕ pode-se obter a nova relação R'/X' adequada a aplicação do método Desacoplado Rápido.

Se, por exemplo, $R = 2,0 \Omega$ e $X = 1,0 \Omega$, a relação R/X será igual a 2,0. Para um ângulo de $\phi = 45^\circ$, ter-se-á $R' = \sqrt{2} / 2 \Omega$ e $X' = 3 \sqrt{2} / 2 \Omega$, resultando numa nova relação $R'/X' = 0,33$.

Uma vez definido o ângulo ϕ , comum a toda rede, todas as impedâncias são alteradas, resultando em uma nova rede. Para que o estado (tensões e ângulos) obtido após a aplicação do método Desacoplado Rápido não se altere, as injeções de potências ativa (P) e reativa (Q) também devem ser modificadas, como mostrado a seguir.

As relações entre potência complexa (S), tensão complexa (E), impedância (Z) e corrente complexa (I), podem ser descritas como:

$$S = E \cdot I^*, \text{ e} \quad (2.5)$$

$$I = E/Z \quad (2.6)$$

substituindo-se Z por $Z' e^{-j\phi}$, tem-se:

$$I = \frac{E}{Z' e^{-j\phi}} \quad (2.7)$$

ou seja, pela equação (2.7) vê-se que se às correntes for aplicada uma rotação de mesmo valor mas de sentido oposto à aplicada nas impedâncias, as tensões complexas não se alterarão. Logo, para a potência complexa tem-se:

$$S' = E (I')^* , \text{ ou} \quad (2.8)$$

$$S' = S e^{j\phi} \quad (2.9)$$

ou ainda, para as partes real e imaginária:

$$P' = P \cos \phi - Q \sin \phi \quad (2.10)$$

$$Q' = P \sin \phi + Q \cos \phi \quad (2.11)$$

Desta maneira, aplicando-se a rotação de eixos aos valores especificados de potência ativa e reativa, além das impedâncias, o método Desacoplado Rápido apresenta bom desempenho e fornecerá o mesmo estado (tensões complexas) da rede original. Após a convergência, às grandezas de interesse é aplicado a rotação em sentido inverso antes da impressão dos resultados.

A figura 2.2 a seguir apresenta o algoritmo básico do método Desacoplado Rápido com a aplicação da técnica Rotação de Eixos.

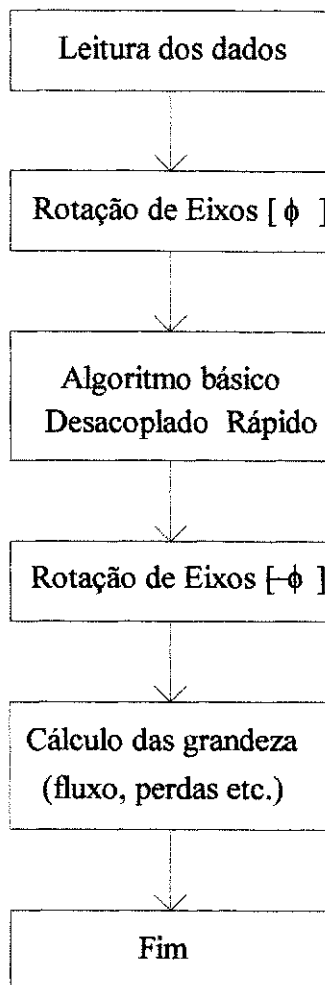


Figura 2.2 - Algoritmo básico do método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos

2.3 - Desempenho do método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos

Exaustivos testes foram realizados nos sistemas de distribuição da região Norte-Nordeste. Milhares de simulações de fluxo de potência foram executados para verificação do desempenho da técnica de Rotação de Eixos. Entretanto, somente uma pequena quantidade pode ser apresentada neste trabalho. Os sistemas testados são alimentadores de distribuição (13.8 kV), atualmente em uso nas empresas concessionárias da região Norte-Nordeste, que apresentam dificuldades de convergência. Estes alimentadores contêm linhas com capacitores

em paralelo, reguladores de tensão em série e grandes e pequenas impedâncias série e alta relação R/X.

A tabela 2.1 apresenta o desempenho dos métodos Desacoplado Rápido - DR e Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos - DRR. Para as simulações realizadas empregando este último método foi utilizado o ângulo de 40°, enquanto as tolerâncias de potências ativa (ΔP) e reativa (ΔQ) utilizadas para ambos os métodos foi de 10^{-6} pu.

Tabela 2.1 - Desempenho dos métodos DR e DRR

Alimentador	N° de Barras	N° de Iterações	
		DR	DRR
01L2 DIN	23	13.5	6.5
01L6 PLS	17	15	6.0
01L4 PLS	23	11.5	5.0
01L3 ITO	36	9.0	5.0
01L2 BJC	19	8.5	5.0
01L4 RIC	46	15.5	5.0
01L4 CTE	23	11.0	6.0

A figura 2.3 apresenta um gráfico do Número de Iterações versus Ângulo de Rotação obtido a partir da simulação do alimentador 01L2 da subestação Dona Inês. Foram feitas várias simulações com os dados do mesmo alimentador variando apenas o ângulo de rotação.

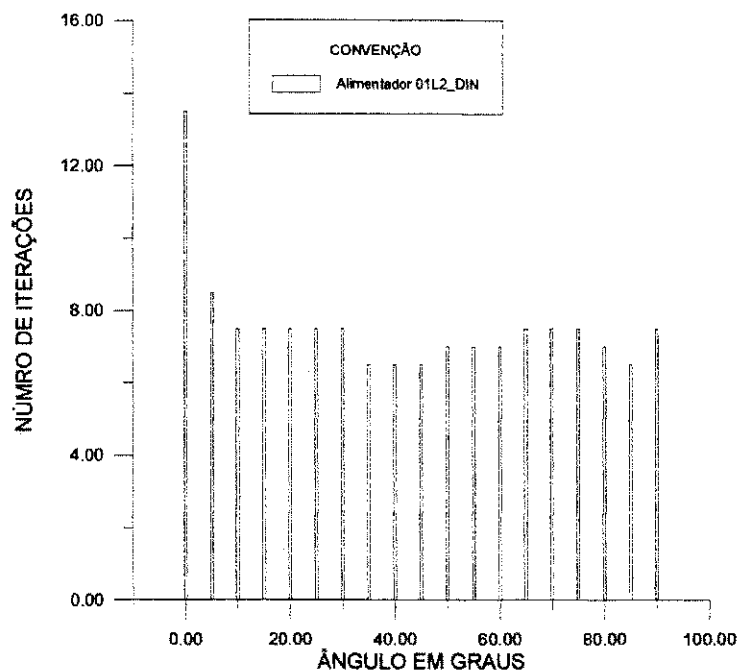


Figura 2.3 - Aplicação da técnica Rotação de Eixos ao método Desacoplado Rápido

Pela experiência adquirida ao longo do trabalho constata-se que o valor do ângulo de rotação é arbitrado de acordo com a rede em estudo, podendo ser obtido um valor "ótimo" para cada rede. Pelas simulações realizadas nos sistemas analisados o melhor valor do ângulo oscila em torno de 40° .

Estes resultados mostram que o desempenho do método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos é bastante superior ao método Desacoplado Rápido convencional, principalmente para aplicações em sistemas de distribuição de difícil convergência.

É importante assinalar que a confiabilidade, bem como a velocidade de convergência apresentadas pelo método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos foram duas importantes características apresentadas pela referida técnica. Para se ter uma idéia, não foi encontrado nenhum alimentador de distribuição que não convergisse, além disso o tempo de convergência nos casos mais críticos foi da ordem de 5 centésimos de segundos.

CAPÍTULO 3

MÉTODO DE SOMA DE POTÊNCIAS

3.1 - Introdução

O método de Soma de Potências [1] é bastante eficiente para o cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição com configuração radial em termos de velocidade (gasta pouco tempo de CPU em relação aos outros métodos) e de economia na utilização de memória (não gera matrizes esparsas).

3.2 - Método de Soma de Potências

A solução do problema de fluxo de potência em sistema radial, usando o método de Soma de Potências, consiste em resolver, para cada trecho da rede, uma equação do quarto grau em termos de tensão nodal.

A figura 3.1 apresenta o diagrama de barras de um trecho de um sistema contendo um nó fonte, uma linha de distribuição e uma barra de carga.

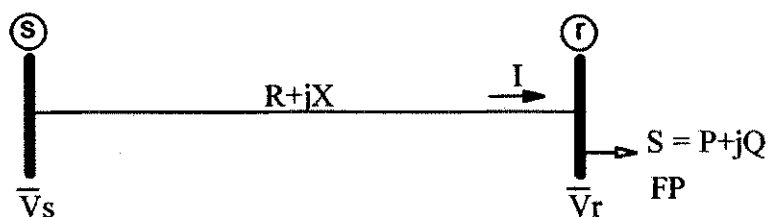


Figura 3.1 - Trecho de um SDEE

onde:

s : nó do lado da fonte;

r : nó do lado da carga;

\bar{V}_s : tensão do nó da fonte ($\bar{V}_s = V_s \angle \phi_s$);

\bar{V}_r : tensão do nó da carga ($\bar{V}_r = V_r \angle \phi_r$);

R, X : resistência e reatância da linha;

P, Q : potência ativa e reativa da carga;

S : potência aparente da carga;

FP : fator de potência da carga.

A figura 3.2 mostra o circuito equivalente monofásico do sistema apresentado na figura 3.1.

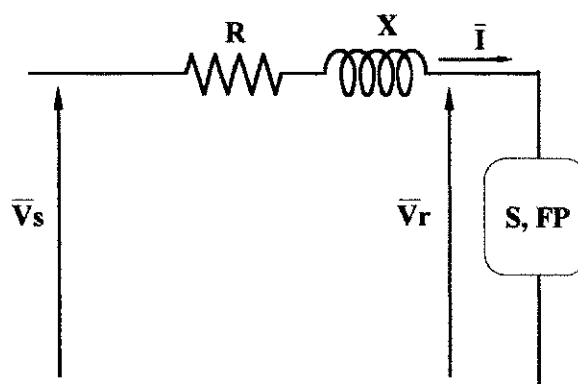


Figura 3.2 - Circuito monofásico equivalente de um trecho de um SDEE

Desse modo,

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r = \bar{I}(R + jX) \quad (3.1)$$

Mas,

$$\bar{I} = \frac{P - jQ}{\bar{V}_r^*} \quad (3.2)$$

Logo,

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r = (P - jQ)(R + jX) \frac{1}{\bar{V}_r^*} \quad (3.3)$$

$$V_s \angle \phi_s - V_r \angle \phi_r = (P - jQ)(R + jX) \frac{1}{V_r \angle -\phi_r} \quad (3.4)$$

Multiplicando por $V_r \angle -\phi_r$, tem-se:

$$V_s V_r \angle (\phi_s - \phi_r) - V_r^2 = (P - jQ)(R + jX) \quad (3.5)$$

Transformando para a forma retangular:

$$V_s V_r [\cos(\phi_s - \phi_r) + j \operatorname{sen}(\phi_s - \phi_r)] - V_r^2 = (P - jQ)(R + jX) \quad (3.6)$$

Separando as partes real e imaginária e fazendo $(\phi_s - \phi_r) = \theta$, tem-se:

$$V_s V_r \cos \theta - V_r^2 = PR + QX \quad (3.7)$$

$$V_s V_r \operatorname{sen} \theta = PX - QR \quad (3.8)$$

Evidenciando $\cos \theta$ e $\operatorname{sen} \theta$ nas equações (3.7) e (3.8), respectivamente, e elevando-os ao quadrado, tem-se:

$$\cos^2 \theta = \frac{V_r^4 + 2(PR + QX) + (PR + QX)V_r^2}{(V_s V_r)^2} \quad (3.9)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{(PX + QR)^2}{(V_s V_r)^2} \quad (3.10)$$

Somando as equações (3.9) e (3.10), multiplicando por $(V_s V_r)$ e simplificando, obtém-se:

$$V_r^4 + [2(PR + QX) - V_s^2] V_r^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \quad (3.11)$$

A equação fornece o módulo da tensão na barra carga conhecendo-se a tensão na barra fonte, a impedância da linha e a potência da carga. Essa equação é a parte fundamental no processo do cálculo do fluxo de potência para sistemas radiais.

A fase da tensão na barra carga pode ser calculada pela expressão:

$$\phi_r = \phi_s - \sin^{-1} \left(\frac{PX - QR}{V_s V_r} \right) \quad (3.12)$$

As equações (3.11) e (3.12) dão a solução direta para o módulo e a fase da tensão para um SDEE radial que contém apenas duas barras, sendo uma fonte e outra de carga.

Para um sistema com mais de duas barras a potência equivalente de cada barra de carga deve ser calculada de modo a permitir o uso das equações (3.11) e (3.12), tomando-se duas a duas.

O processo de cálculo da potência equivalente para uma determinada barra consiste em somar as potências referentes às cargas e às perdas de potência dos ramos que estão depois da barra de interesse. Na soma das cargas é incluída a carga própria da barra. Esse processo é realizado do nó carga ao nó fonte, ou seja, é um processo de baixo para cima.

Uma vez calculada a potência equivalente para cada barra do sistema, inicia-se o cálculo das tensões através das equações (3.11) e (3.12). Esse processo começa na barra fonte e vai em direção ao nó carga, tomando-se as barras duas a duas. Uma barra que se comporta como sendo de carga numa primeira fase do processo, torna-se barra fonte na fase seguinte após o cálculo da tensão. Repete-se esta sistemática até o nó terminal. Nesse processo, a rede de distribuição é percorrida de cima para baixo.

Dessa forma, o algoritmo do método de Soma de Potências para a solução do fluxo de potência radial consiste em:

1. Ler os dados de rede, incluindo parâmetros de linha, topologia, tensão do nó fonte (módulo e fase) e cargas para a tensão nominal;
2. Assumir um perfil de tensão inicial para cada nó e calcular as cargas que dependem da tensão;
3. Calcular a potência equivalente de cada barra (processo de baixo para cima);
4. Calcular o novo perfil de tensão para cada nó usando as equações (3.11) e (3.12) (processo de cima para baixo);
5. Com o novo perfil de tensão, calcular as perdas e as cargas que variam com a tensão;
7. Controlar a convergência pela tensão (módulo e fase). Não convergindo, voltar para o passo 3;
8. Calcular os fluxos de potência, perdas etc.

As perdas ativas e reativas do trecho podem ser calculadas pelas equações:

$$P_p = R \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3.13)$$

$$P_q = X \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3.14)$$

onde:

P_p e P_q : perdas ativa e reativa do trecho;

R e X : resistência e reatância do trecho;

P e Q : potências ativa e reativa da carga;

V_r : módulo da tensão no carga.

A figura 3.3 mostra o fluxograma do método de Soma de Potências.

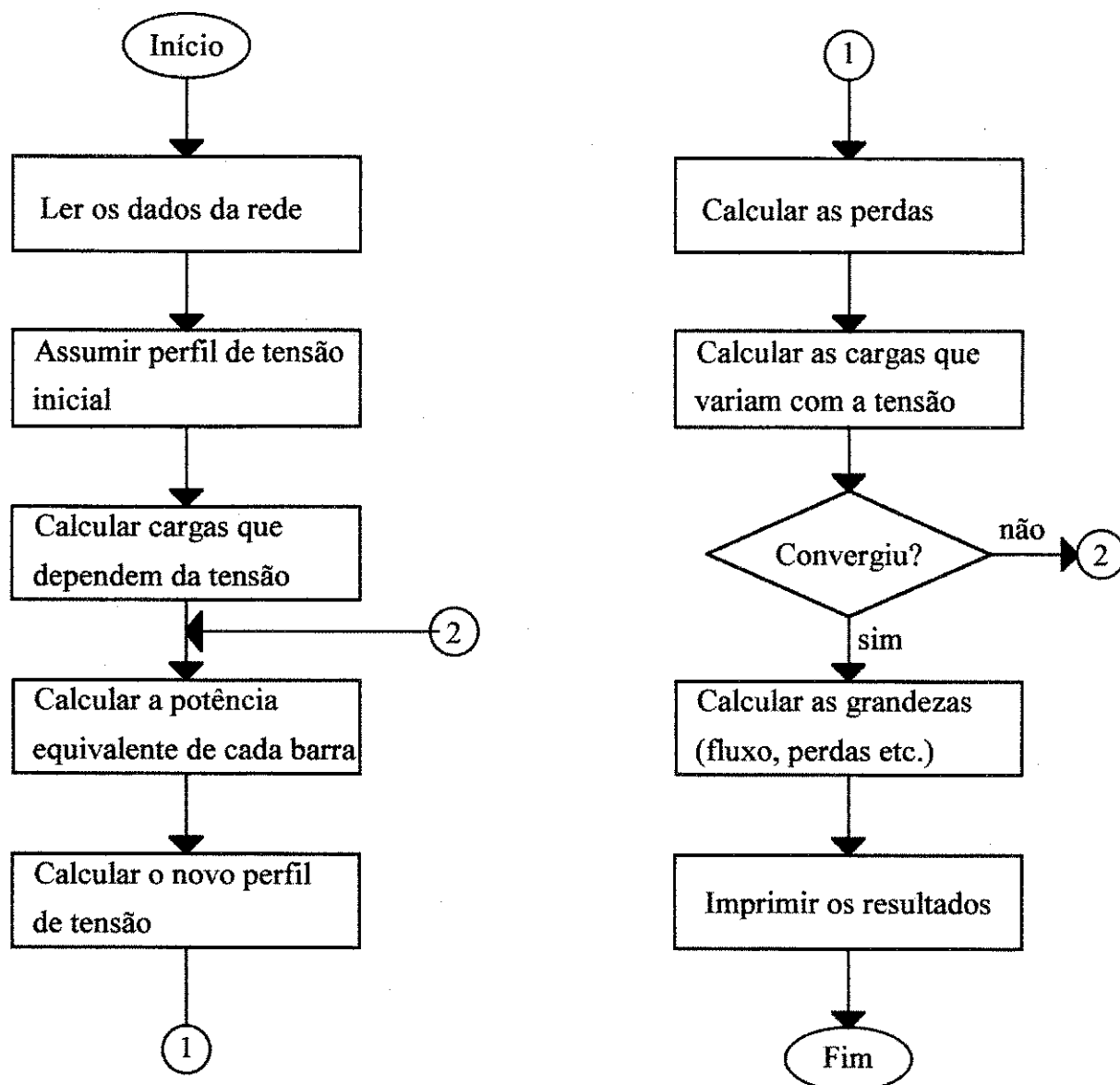


Figura 3.3 - Fluxograma do método Soma de Potências

3.3 - Desempenho do Método de Soma de Potências

Exaustivos testes foram realizados nos sistemas de distribuição da região Norte-Nordeste. Milhares de simulações de fluxo de potência foram executados para verificação do desempenho do método Soma de Potências. Entretanto, apenas uma pequena quantidade pode ser apresentada neste trabalho. Os sistemas testados são os mesmos apresentados no capítulo anterior.

A tabela 3.1 apresenta o desempenho dos métodos Desacoplado Rápido - DR e Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos - DRR e Soma de Potências - SP. Para as simulações realizadas foram utilizadas as tolerâncias de potência ativa (ΔP) e reativa (ΔQ) de 10^{-6} pu.

Tabela 3.1 - Desempenho dos métodos DR, DRR e SP

Alimentador	N° de Barras	N° de Iterações		
		DR	DRR	SP
01L2 DIN	23	13.5	6.5	6
01L6 PLS	17	15.0	6.0	6
01L4 PLS	23	11.5	5.0	5
01L3 ITO	36	9.0	5.0	5
01L2 BJC	19	8.5	5.0	2
01L4 RIC	46	15.5	5.0	4
01L4 CTE	23	11.0	6.0	5

Pelos resultados apresentados anteriormente demonstra-se claramente que ambos os métodos Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos e Soma de Potências obtiveram bastante sucesso nas simulações dos sistemas de distribuição da região Norte-Nordeste.

É importante assinalar que a confiabilidade, bem como a velocidade de convergência foram duas características apresentadas também pelo método Soma de Potências. Para se ter uma idéia, não foi encontrado nenhum circuito prático que não convergisse, além disso a velocidade de convergência nos casos mais críticos foi da mesma ordem de grandeza do método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos.

CAPÍTULO 4

LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1 - Introdução

Um dos grandes problemas para simulação dos sistemas de distribuição usando o computador digital é o processo de levantamento e montagem dos arquivos de dados. Nas concessionárias que não dispõem de um sistema informatizado de gerência de redes, este processo é bastante trabalhoso devido a uma série de fatores, tais como: a falta ou pouca medição operacional, grande quantidade de informações etc. Este fato se reflete na qualidade dos resultados obtidos quando da realização dos estudos de planejamento e operação desses sistemas.

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos **atual** e **utilizado** para o levantamento e montagem dos arquivos de dados praticados pelas empresas que não dispõem de gerência de rede.

O procedimento **utilizado** é uma das grande contribuições deste trabalho, na medida que se otimiza os tempos gastos nos procedimentos de levantamento e montagem dos arquivos de dados. Isto contribui sobremaneira para ampliar ainda mais a utilização de fluxo de potência nos sistemas de distribuição.

4.2 - Procedimento Atual

Atualmente, o procedimento para a composição do arquivo de dados dos sistemas de distribuição da maioria das empresas concessionárias de energia elétrica é praticamente o mesmo. As poucas empresas que dispõem de um sistema de gerência de redes, onde o procedimento é automatizado, apresentam grandes vantagens em relação às demais, principalmente, no que diz respeito à qualidade dos dados disponíveis, o que possibilita estudos mais elaborados.

A seguir será descrito o procedimento atualmente utilizado pela maioria das empresas de distribuição de energia elétrica para simulação de sistemas de distribuição.

4.2.1 - Dados de Entrada

Os dados de entrada do fluxo de potência são basicamente divididos em três grupos: dados gerais do sistema, dados de linha e dados de barra.

4.2.1.1 - Dados Gerais do Sistema

Estes dados compreendem as seguintes informações:

- a) Nome da subestação;
- b) Nome do alimentador;
- c) Tensão da subestação;
- d) Potência base;
- e) Tolerâncias;
- f) Data;

g) Número máximo de iterações.

4.2.1.2 - Dados de Linha

Nos dados de linha são fornecidas as seguintes informações:

- a) Topologia da rede (barra-origem e barra-fim de cada trecho);
- b) Distância correspondente a cada trecho, em km;
- c) Seção transversal e tipo do condutor correspondente a cada trecho (distância entre duas barras) do alimentador;
- d) Capacidade de condução dos condutores, em Amperes;
- e) Reatância dos transformadores e reguladores;
- f) Valor do "TAP" de transformadores, reguladores e "auto-boosters".

4.2.1.3 - Dados de Barra

Nos dados de barra são fornecidas as seguintes informações:

- a) Número da barra;
- b) Nome da barra;
- c) Tensão inicial;
- d) Potência aparente da carga;
- e) Fator de potência da carga;
- f) Demanda máxima dos consumidores com este tipo de medição;
- g) Percentual da carga que é impedância constante (ativa e reativa);

- h) Potência(s) nominal(is) do(s) banco(s) de capacitor(es) para compensação de reativos.

4.2.2 - Formação dos Dados de Barra

Para a formação dos dados de barra do sistema que se deseja analisar, deve-se proceder da seguinte maneira:

Em primeiro lugar, escolhe-se os pontos do alimentador onde se vai fazer a concentração de carga, levando-se em consideração os seguintes critérios:

- a) Pontos onde existem derivação de ramal;
- b) Pontos de bifurcação da linha tronco da rede;
- c) Pontos de mudança da seção transversal do condutor ou do tipo de cabo;
- d) Pontos onde existem consumidores primários com capacidade instalada igual ou superior a 225kVA (para o caso SAELPA);
- e) Pontos onde existem núcleos residenciais isolados;
- f) Pontos extremos dos alimentadores;
- g) Pontos onde existem bancos de reguladores, "auto-boosters" ou banco de capacitores.

Além dos pontos determinados pelos critérios anteriores, pode-se colocar barra em qualquer ponto do alimentador, sendo que a quantidade destas, é função da densidade de carga e/ou da distância.

Em segundo lugar, determina-se a potência ativa e reativa de cada barra considerando-se as características dos consumidores que a ela estão ligados.

Deste modo, os sistemas de distribuição das empresas apresentam 04 (quatro) tipos de barras:

a) Barra composta exclusivamente por consumidores primários (um ou mais)

Neste caso, a potência desta barra é o somatório da demanda ativa em carga máxima coincidente dos consumidores a ela ligados. Necessita-se, portanto, da demanda máxima em kW e fator de potência dos consumidores atendidos em tensão primária que possuem este tipo de medição.

$$P_b = \frac{\sum_{i=1}^n D_{cpi}}{F_D} \quad (4.1)$$

onde:

P_b : demanda da barra, em kW;

n : número de consumidores primários;

D_{cpi} : demanda máxima de cada consumidor primário, em kW, na barra i ;

F_D : fator de diversidade dos consumidores envolvidos.

b) Barra composta exclusivamente por consumidores urbanos ligados em baixa tensão

A determinação da potência ativa da barra composta exclusivamente por consumidores urbanos ligados em baixa tensão é realizada da seguinte maneira:

$$P_b = F_{U_{ur}} \cdot S_{ur} \cdot FP_{ur} \quad (4.2)$$

onde:

FU_{ur} : fator de utilização dos transformadores de distribuição urbana
medido a partir de uma amostra;

FP_{ur} : fator de potência dos transformadores de distribuição urbana
medido a partir de uma amostra;

S_{ur} : somatório da potência aparente dos transformadores de distribuição urbana ligados à barra.

c) Barra composta exclusivamente por consumidores rurais

A determinação da potência ativa da barra composta exclusivamente por consumidores rurais é realizada da seguinte maneira:

$$P_b = FU_{ru} \cdot S_{ru} \cdot FP_{ru} \quad (4.3)$$

onde:

FU_{ru} : fator de utilização dos transformadores de distribuição rural
medido a partir de uma amostra;

FP_{ru} : fator de potência dos transformadores de distribuição rural
medido a partir de uma amostra;

S_{ru} : somatório da potência aparente dos transformadores de distribuição rural ligados à barra;

d) Barra mista

É aquela barra composta por consumidores primários agrupados juntamente com consumidores urbanos de baixa tensão e/ou rurais.

Neste caso, a potência ativa da barra é determinada pela composição do somatório da demanda máxima coincidente dos consumidores primários e a respectiva potência ativa da barra dos consumidores urbanos e/ou rurais, conforme a expressão a seguir:

$$P_b = \frac{\sum_{i=1}^n D_{cpi}}{F_D} + F_{U_{ur}} \cdot S_{ur} \cdot F_{P_{ur}} + F_{U_{ru}} \cdot S_{ru} \cdot F_{P_{ru}} \quad (4.4)$$

Finalmente, é feito uma compatibilização da potência calculada em cada barra com a demanda máxima do alimentador, normalmente disponíveis nas concessionárias (corrente do alimentador), reproduzindo o mais fielmente possível o estado do sistema nas condições de carga máxima e mínima. Este procedimento é efetuado de forma manual, isto porque necessita-se processar o fluxo de potência várias vezes e fazer as devidas alterações na potência das barras, com auxílio da interferência humana.

Para o cálculo da potência reativa dos vários tipos de barras apresentados anteriormente, multiplica-se a potência ativa da barra pela tangente do arco co-seno do fator de potência, caso este ângulo seja conhecido. Caso contrário, utiliza-se o fator de potência da subestação.

4.3 - Procedimento Utilizado

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema computacional com os seguintes objetivos: montar os arquivos de dados para serem utilizados nos

programas fluxo de potência e gerador do diagrama unifilar de barras da rede. Com este sistema, a formação destes arquivos se realiza de forma simples e rápida, além de permitir a eliminação de erros normalmente apresentados neste tipo de atividade.

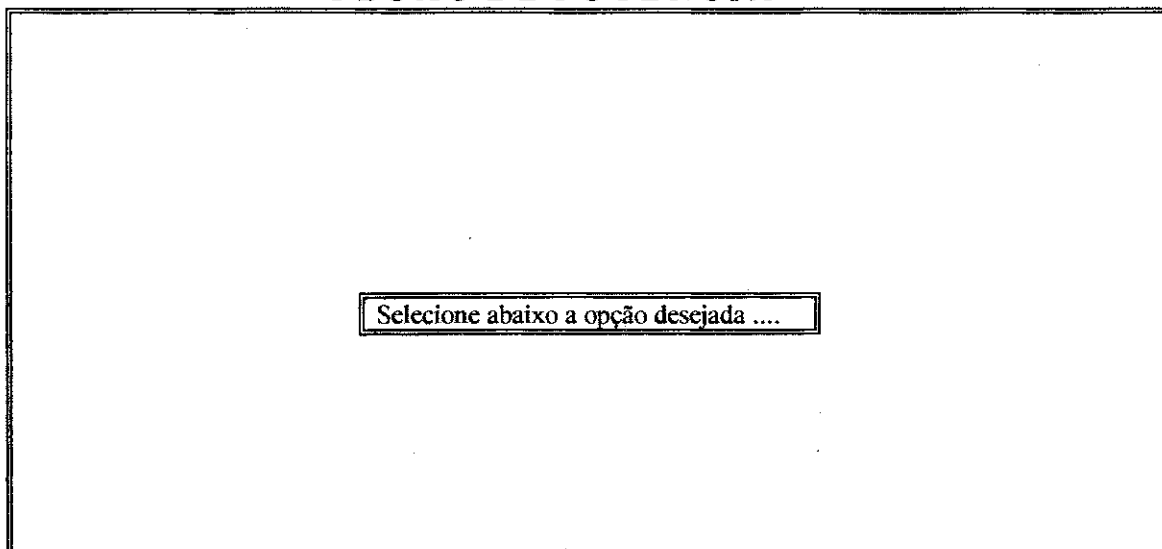
Este sistema foi desenvolvido em linguagem "CLIPPER" 5.01, e apresenta uma interface homem-máquina bastante amigável. Desta forma, qualquer usuário, sem o mínimo de conhecimento da estrutura do arquivo de dados, é capaz de montá-lo sem maiores dificuldades.

Este programa utiliza o mesmo procedimento de cálculo para determinar as potências ativa e reativa das barras apresentado anteriormente, porém de forma informatizada.

Após a formação do arquivo de dados, é feita uma compatibilização das potências calculadas em cada barra, com a demanda máxima medida do alimentador, com o auxílio do programa de fluxo de potência. Este procedimento é realizado de forma automática, de maneira que a diferença entre a geração obtida no processamento e a medição seja a menor possível ($< 2\%$).

A seguir são apresentadas as telas do programa montador de arquivos de dados, baseadas em perguntas e respostas, necessárias a sua composição:

A tela principal a seguir apresenta as opções de montagem do arquivo de dados do sistema de interesse, relação dos arquivos já existentes, relação dos condutores do sistema previamente cadastrados, bem como a alternativa de montagem de um outro arquivo deste mesmo sistema, visando a formação do diagrama unifilar, e finalmente a opção de saída, conforme figura 4.1.

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS**FLUXO DE POTÊNCIA**

F1 - Monta Arquivos

F2 - Relação dos Arquivos

F3 - Cabos

F4 - Monta Arquivos para Diagrama Unifilar

[ESC] - Sai

Figura 4.1 - Tela principal do programa montador

A figura 4.2 a seguir, solicita as informações sobre o nome do arquivo de dados a ser formado do alimentador e da subestação que o mesmo faz parte, a distância entre as barras do sistema, o tipo do circuito, os percentuais de impedância constante na modelagem de carga (potências ativa e reativa) e finalmente a opção de saída.

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS**FLUXO DE POTÊNCIA**

INFORMAÇÕES SOBRE OS ARQUIVOS	
Arq. de dados :	LIPTS.DAT
Alimentador :	01L1_PTS
Subestação :	PATOS
Distância (Metro ou Kilômetro) ? K	
Tipo do Circuito (Subtransmissão - Distribuição) ? D (Circuito secundário)	
MODELAGEM DE CARGA	
Valor de P(%) para Impedância constante =	50
Valor de Q(%) para Impedância constante =	100

Preencha os dados corretamente.

[ESC] - Retorna

Figura 4.2 - Informações sobre os arquivos

A figura 4.3 a seguir, apresenta as informações gerais como valores preliminares, compreendendo as tolerâncias das potências ativa e reativa, os valores base do sistema, bem como o fator de diversidade dos consumidores do Grupo A, fator de utilização dos transformadores localizados nas zonas urbana e rural e respectivos fatores de potência.

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS

FLUXO DE POTÊNCIA

INFORMAÇÕES GERAIS		
Tolerâncias :	- Potência Ativa	= 0.000001
	- Potência Reativa	= 0.000001
Bases :	Potência (MVA)	= 100.0
	Tensão (kV)	= 13.8
Fatores :	Diversidade do Grupo A	= 1.20
	Fator de Utilização Urbano	= 0.80
	Fator de Potência Urbano	= 0.90
	Fator de Utilização Rural	= 0.25
	Fator de Potência Rural	= 0.80

Preencha os dados corretamente.

[ESC] - Retorna

Figura 4.3 - Informações gerais.

A figura 4.4 a seguir, solicita os dados obtidos a partir da medição operacional do sistema a ser analisado, para se fazer a compatibilização com o resultado gerado, via processamento, pelo fluxo de potência. Estes dados compreendem os valores de demanda e tensão da barra "slack".

Solicita ainda os dados necessários, caso se deseje calcular as perdas de energia do sistema em análise. Estes dados compreendem a quantidade de patamares que a curva de carga do sistema foi modulada e sua duração, bem como os respectivos valores de demanda e tensão na barra "slack". Das análises efetuadas, a maioria das curvas de carga dos alimentadores e subestações levantadas foi modulada em 04 (quatro) patamares. Isto não significa que este valor seja o padrão.

A figura 4.5 mostra a curva de carga média mensal para um dia útil, típica de um alimentador de distribuição, localizado no interior do Estado da Paraíba, onde atende a vários municípios

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS FLUXO DE POTÊNCIA

DADOS DOS CASOS				
Número de Casos que serão analisados? 4				
CAS O	DURAÇÃO	kW Medido	kvar Medido	Tensão (kV)
1	7	1578.60	764.50	14.20
2	10	1733.00	839.20	14.20
3	4	2293.10	1110.50	14.20
4	3	1957.60	948.00	14.20

Preencha os dados corretamente.

[ESC] - Retorna

Figura 4.4 - Dados dos casos

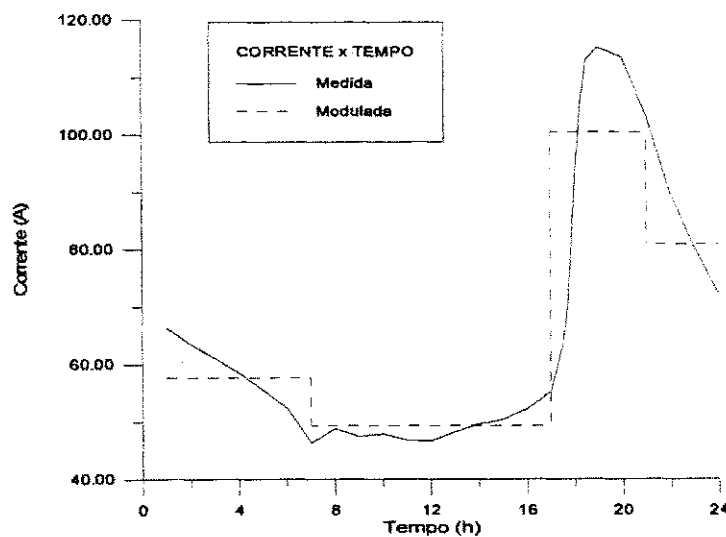


Figura 4.5 - Curva de carga média mensal (dia útil) típica de um alimentador de distribuição do interior do Estado da Paraíba.

A figura 4.6 a seguir, apresenta as opções de incluir, alterar ou eliminar as informações referentes aos dados de linha do sistema em análise. Estes dados

compreendem o número das barras de partida e chegada, a distância entre elas e o respectivo código do tipo de cabo, conforme detalhe apresentado na figura 4.7.

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS

FLUXO DE POTÊNCIA

DADOS DE LINHA	
Barra de Partida = 1	Barra de Chegada = 2
Distância (km) = 0.50	
Código do Cabo [F1 - Ajuda] = 6	

Este RAMO já foi cadastrado, Pressione a tecla :

[ENTER] - Altera

[ESC] - Retorna

[D] - Elimina o RAMO

Figura 4.6 - Dados de linha e transformador

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS

FLUXO DE POTÊNCIA

DADOS DE LINHA	
Barra de Partida = 1	Barra de Chegada = 2
Distância (km) = 0.50	
Código do Cabo [F1 - Ajuda] = 6	

CABOS	
1	4 Cu
2	2 Cu
3	1/0 CAA
4	1/0 Cu
5	4/0 Cu
6	336.4 CAA
.	.
.	.

Este RAMO já foi cadastrado, Pressione a tecla :

[ENTER] - Altera

[ESC] - Retorna

[D] - Elimina o RAMO

Figura 4.7 - Dados de linha (detalhe do código do tipo de cabo)

A figura 4.8 apresenta as opções de incluir, alterar ou eliminar as informações referentes aos dados de barra do sistema em análise. Estes dados compreendem o número, nome e tipo da barra, e se esta barra deve ou não fazer parte do gráfico do perfil de tensão, após os resultados obtidos com o fluxo de potência. Nesta figura solicita-se também os dados de potência, em kVA, urbano e rural, as informações sobre kVA, demanda e fator de potência dos consumidores que os possuem (Grupo A), além da possibilidade de inclusão de banco de capacitores.

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS FLUXO DE POTÊNCIA

DADOS DE BARRA	
Barra = 1	
Nome = SE PATOS	Perfil de Tensão S/N = S
Tipo = Passagem, Carga, Subestação = S	
kVA Urbano	= 0.00
kVA Rural	= 0.00
kVA Grupo A	= 0.00
kW Grupo A	= 0.00
FP Grupo A	= 0.00
Capacitores (kvar) = 300.00	

Este RAMO já for cadastrado, Pressione a tecla :

[ENTER] - Altera

[ESC] - Retorna

[D] - Elimina o RAMO

Figura 4.8 - Dadas de barra

A figura 4.9 apresenta os ramos já cadastrados nos dados de linha e ao mesmo tempo solicita informação sobre a direção do ramo. Este dado orienta o programa que desenha o diagrama unifilar (Unif) na formação da árvore. As informações sobre os equipamentos de rede também são solicitadas.

MONTADOR DO ARQUIVO DE DADOS**FLUXO DE POTÊNCIA**

DADOS DE LINHA	
Barra de Partida = 1	Barra de Chegada = 2
Distância (km) = 0.50	Cabo = 1/0 CAA
Código do Cabo [F1 - Ajuda] = 6	
Selecione o sentido do Ramo ou Elemento a ser inserido.	
<ul style="list-style-type: none">(→) - Direita(↓) - Baixo(←) - Esquerda(↑) - Cima(*) - Barra de interligação(-) - Banco de capacitores(/) - Chave(+) - Regulador	

[ENTER] - Retorna

PgDn - Próximo

PgUp - Anterior

Figura 4.9 - Tela para apoiar a formação do arquivo de dados para traçar o diagrama unifilar da rede.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM DE CARGA

5.1- Introdução

Os modelos utilizados para a representação das cargas dependem basicamente do tipo de estudo a ser realizado, podendo ser desde uma análise de fluxo de potência e curto-circuito, que retratam uma dada condição de regime permanente, a uma análise dinâmica de estabilidade e/ou transitórios eletromagnéticos.

Em cada uma dessas áreas de análise existem condições particulares que afetam a maneira de se representar as cargas. No caso dos estudos de fluxo de potência, os resultados dependem de forma bastante significativa da modelagem da carga utilizada nos estudos em regime permanente.

A composição exata das cargas por barra é normalmente difícil de ser estabelecida, uma vez que ela muda continuamente, refletindo o modo de utilização dos vários equipamentos, e varia dependendo do estilo de vida/regime de trabalho do usuário, do clima/estação do ano, passando pelas condições econômicas e macroeconômicas da região. Em decorrência destas limitações, torna-se desejável que se conheça os modelos de cargas, pelo menos, para situações críticas de interesse, como carga leve e pesada, em determinados períodos.

5.2 - Considerações Básicas

Nos sistemas reais, as cargas são formadas por um conjunto de diversos dispositivos que absorvem energia, cada um com características diferentes. De uma maneira geral não podem ser determinadas expressões analíticas para a representação da carga e são utilizados procedimentos empíricos. De uma forma geral, as relações entre as potências ativa e reativa com a tensão e a frequência, podem ser expressas pelas equações:

$$P = f_1(f, |V|) \quad (5.1)$$

$$Q = f_2(f, |V|) \quad (5.2)$$

Na maioria dos casos práticos, procura-se determinar as variações ΔP e ΔQ nas cargas ativas e reativas causadas por variações pequenas, Δf e $\Delta|V|$, na frequência e na tensão. Das equações (5.1) e (5.2), tem-se:

$$\Delta P \approx \frac{\partial P}{\partial f} \cdot \Delta f + \frac{\partial P}{\partial |V|} \cdot \Delta |V| \quad (5.3)$$

$$\Delta Q \approx \frac{\partial Q}{\partial f} \cdot \Delta f + \frac{\partial Q}{\partial |V|} \cdot \Delta |V| \quad (5.4)$$

Estas derivadas parciais não podem ser determinadas analiticamente e portanto devem ser determinadas empiricamente. Um grande número de estudos tem sido realizado com a finalidade de determinar o comportamento da demanda frente a variações da tensão. Por exemplo, uma carga composta formada por:

- Motores de Indução - 60 %
- Motores Síncronos - 20 %

- Outros - 20 %

apresenta, aproximadamente, as seguintes taxas de variação da potência em relação à tensão e à frequência:

$$\frac{\partial P}{\partial V} \approx 1,0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V} \approx 1,3$$

$$\frac{\partial P}{\partial f} \approx 1,0$$

(Não se dispõe de $\frac{\partial Q}{\partial f}$, o que é de pouca importância.)

No caso de sistemas de distribuição de energia elétrica que em geral são conectados aos sistemas de potência de grande porte onde a variação da frequência é bastante pequena, considera-se:

$$\frac{\partial P}{\partial f} \cdot \Delta f \approx 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial f} \cdot \Delta f \approx 0$$

Desta forma, são consideradas apenas as variações de potências ativa e reativa em relação à tensão.

5.3 - Modelos Simplificados de Cargas Elementares

As cargas elementares de um sistema de potência são usualmente classificadas em três tipos:

5.3.1 - Impedância Constante

Neste tipo de carga a impedância oferecida à passagem de corrente é considerada fixa. As potência ativas e reativas variam com o quadrado da tensão.

Assim:

$$P(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2$$

$$Q(V) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2$$

onde:

$P(V)$ - potência ativa da carga na tensão V ;

$Q(V)$ - potência reativa da carga na tensão V ;

P_0 - potência ativa da carga na tensão V_0 ;

Q_0 - potência reativa da carga na tensão V_0 ;

V_0 - tensão de referência;

V - tensão na barra.

Quando da aplicação do processo iterativo de solução da rede, a representação por impedância constante favorece a convergência do fluxo de potência, face à linearidade entre a tensão e a corrente, o que atenua as oscilações de tensão.

5.3.2 - Potência Constante

Neste tipo de carga, tanto a potência ativa como a reativa têm valores fixos, portanto, independentes da tensão. Assim:

$$P(V) = P_0$$

$$Q(V) = Q_0$$

Historicamente, era comum considerar nos estudos de fluxo de potência esse tipo de representação, devido à facilidade de cálculo e implementação computacional. Sua maior desvantagem reside no fato da corrente variar inversamente proporcional com a tensão. Assim, quando a tensão é levada a assumir valores baixos a corrente se eleva substancialmente provocando grandes quedas de tensão e dificultando a convergência.

5.3.3 - Corrente Constante

Neste caso, o módulo da corrente que flue pela carga é considerado constante.

As potências ativa e reativa variam linearmente com a tensão. Assim:

$$P(V) = P_0 \frac{V}{V_0}$$

$$Q(V) = Q_0 \frac{V}{V_0}$$

Esta é uma representação intermediária e pouco usual, e se enquadra entre as dos itens 5.3.1 e 5.3.2 e só é usada em casos específicos onde a corrente da carga é controlada para se manter em um valor constante.

Neste capítulo serão analisados dois modelos usualmente utilizados, a saber: Modelo Exponencial e o Modelo Polinomial.

5.4 - Modelo Exponencial

O modelo exponencial utiliza uma característica geral de carga que é função da tensão:

$$P(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{kp} \quad (5.5)$$

$$Q(V) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{kq} \quad (5.6)$$

onde:

kp - coeficiente associado à variação de potência ativa;

kq - coeficiente associado à variação de potência reativa.

Os parâmetros característicos kp e kq para as várias cargas elementares (homogêneas) estão representados na tabela 5.1.

Deve-se observar que embora essas cargas individuais possam ser de caráter inteiramente aleatório quanto ao ciclo de funcionamento, uma configuração média é vista pelos transformadores de distribuição, alcançando a nível de subtransmissão e principalmente a nível de transmissão uma configuração praticamente previsível [7].

A figura 5.1 apresenta o comportamento da carga para variações na tensão de acordo com a modelagem em questão.

Tabela 5.1 - Cargas Elementares

Carga Elementar	kp	kq
Lâmpada incandescente	1,6	-
Aquecedor e aparelho resistivo	2,0	-
Lâmpada fluorescente	1,2	3,3
Lâmpada vapor de mercúrio	2,5	2,2
Ar condicionado 3 ϕ central	0,1	2,5
Ar condicionado 1 ϕ central	0,2	2,3
Ar condicionado de janela	0,5	2,5
Eletrodoméstico com motor	0,3	1,8
Aparelho de televisão	2,0	3,3
Motor síncrono	0,0	0,0
Motor assíncrono	0,0	1,0

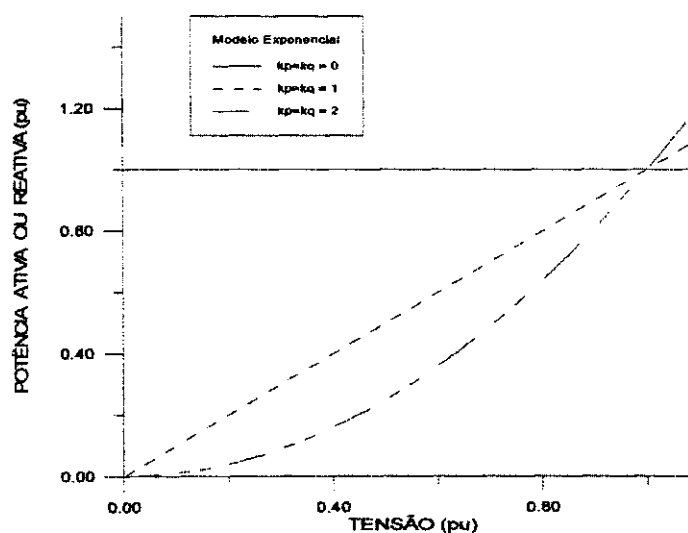


Figura 5.1 - Gráfico representativo de Modelos Exponenciais de Carga variando com a tensão.

5.5 - Modelo Polinomial

O modelo polinomial utiliza uma combinação de cargas elementares tipo potência constante, corrente constante e impedância constante.

Neste modelo, a carga tem sua variação com a tensão expressa por um polinômio de segundo grau, com coeficientes positivos ou nulos:

$$P(V) = P_0 \left[a_0 + a_1 \frac{V}{V_0} + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (5.7)$$

$$Q(V) = Q_0 \left[b_0 + b_1 \frac{V}{V_0} + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (5.8)$$

onde:

a_0 - fração da componente ativa tipo potência constante;

b_0 - fração da componente reativa tipo potência constante;

a_1 - fração da componente ativa tipo corrente constante;

b_1 - fração da componente reativa tipo corrente constante;

a_2 - fração da componente ativa tipo impedância constante;

b_2 - fração da componente reativa tipo impedância constante.

Referindo as expressões (5.7) e (5.8) na base de tensão de referência, tem-se as expressões em por unidade:

$$P(V) = P_0 \left[a_0 + a_1 \frac{V}{V_0} + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (5.9)$$

$$Q(V) = Q_0 \left[b_0 + b_1 \frac{V}{V_0} + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (5.10)$$

Para efeito de simplificação de equacionamento, considere uma carga composta de 50% impedância constante e 50% potência constante. Representando num gráfico $P \times V$, esta composição juntamente com os modelos de carga tipo potência constante, corrente constante e impedância constante (figura 5.2), verifica-se que os erros cometidos ao se utilizar esta composição, em substituição ao de corrente constante para a faixa de tensão 0,9 a 1,05 pu são inferiores a 0,2% [9].

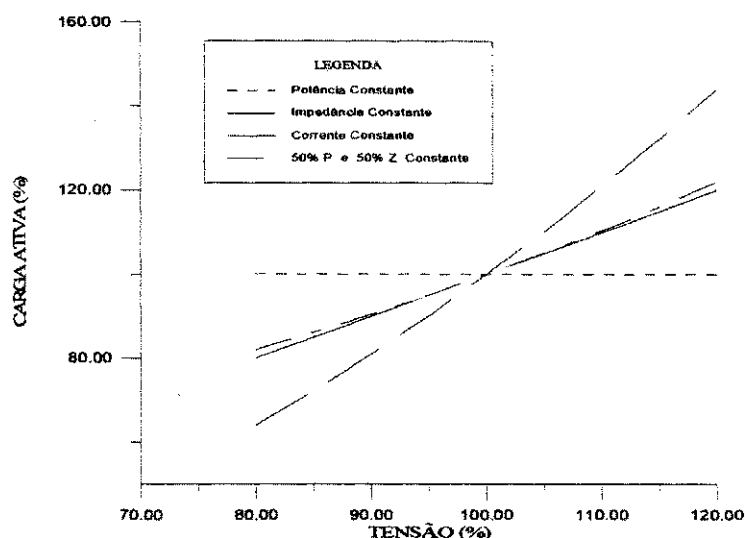


Figura 5.2 - Gráfico representativo de Modelos de Cargas Elementares variando com a tensão.

Este tipo de representação permite substituir a parcela de corrente constante da expressão (5.9), ou seja, $a_1 \frac{V}{V_0}$ por $\frac{1}{2} a_1 + \frac{1}{2} a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2$, obtendo-se:

$$P(V) = P_0 \left[A_0 + A_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (5.11)$$

e de modo análogo,

$$Q(V) = Q_0 \left[B_0 + B_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (5.12)$$

onde:

$$A_0 = a_0 + \frac{1}{2} a_1$$

$$A_2 = a_2 + \frac{1}{2} a_1$$

$$B_0 = b_0 + \frac{1}{2} b_1$$

$$B_2 = b_2 + \frac{1}{2} b_1$$

De uma forma genérica, estas expressões (5.11) e (5.12) podem ser representadas através da seguinte equação:

$$X + Y.V^2 = (\alpha + 100) \quad (5.13)$$

onde :

X : valor percentual da parcela que deve ser representado por potência constante;

Y : valor percentual da parcela que deve ser representado por impedância constante;

α : taxa de variação de potência em relação à tensão ($\partial P/\partial V$ ou $\partial Q/\partial V$);

V : tensão no novo nível, em pu.

Para ilustrar a equação (5.13), considere o caso de uma carga de 100% cuja taxa de variação da demanda com a tensão seja 1,5, isto é:

$$\frac{\partial P}{\partial V} \approx 1,5$$

Neste caso, se ocorrer uma variação de 1% na tensão, a variação correspondente na demanda será de 1,5%. A nova demanda será 101,5% e a equação (5.13) poderá ser escrita como:

$$X + Y \cdot 1,01^2 = 101,5 \quad (5.14)$$

Considerando que:

$$X + Y = 100 \quad (5.15)$$

Substituindo a equação (5.15) na equação (5.14) chega-se a:

$$Y = \frac{1,5}{0,0201} = 74,63 \quad (5.16)$$

Isto significa que a percentagem da carga que deve ser representada como impedância constante é 74,63%.

Nota-se que a equação (5.16) pode ser generalizada da seguinte forma:

$$Y = \frac{\alpha}{V^2 - 1} \quad (5.17)$$

5.6 - Relação entre Demanda e Tensão em Cargas Compostas - Experiência do Electric Power Research Institute - EPRI

Após a crise do petróleo em 1973, as empresas de energia elétrica intensificaram a realização de pesquisas visando o desenvolvimento de novos métodos de administração das cargas com o objetivo de conservação de energia. Algumas empresas já utilizavam a redução de tensão para diminuir a demanda durante o período de contingência. A partir de 1973, diversas empresas passaram a utilizar a redução de tensão para diminuir o consumo de energia. Diversos estudos foram realizados com o objetivo de verificar a eficácia desta redução para conservação de energia. De uma maneira geral os resultados destes estudos eram conflitantes [14].

Esta experiência quantifica as alterações de potência ativa e reativa nas cargas dos circuitos de distribuição como uma função da tensão de suprimento [13]. Um total de oito circuitos de distribuição representando as cargas residencial, comercial e industrial foi monitorado e controlado em um período de 20 meses. Os dados coletados foram usados para avaliar um modelo computacional desenvolvido pelo Universidade do Texas, em Arlington, pelo Electric Power Research Institute - EPRI. O projeto foi desenvolvido em duas fases:

Na primeira fase, os testes tinham o objetivo de analisar o consumo e a eficiência de cada equipamento em relação a tensão aplicada. Os resultados desta fase seriam utilizados em um modelo computacional desenvolvido com o objetivo de prever a variação de potência ativa e reativa em função da variação de tensão.

Na segunda fase, foram realizados testes de campo em alimentadores residenciais, comerciais e industriais. Duas empresas foram selecionadas para realização dos testes:

- Texas Electric Service Company
- The Detroit Edison Company

Foram instalados reguladores, medidores e registradores em diversos alimentadores previamente selecionados, destas empresas. O estudo teve duração aproximadamente de vinte meses. Durante o período foram aplicados dois níveis de tensão:

- 2,5% acima da tensão nominal
- 2,5% abaixo da tensão nominal

Correspondendo desta forma a uma variação de 5%. Os dados foram coletados para cada nível de tensão e em função deles foram determinadas as relações entre potência ativa e reativa absorvida pelo alimentador e a tensão aplicada.

5.6.1 - Apresentação do Sistema

No estudo foram utilizados diversos alimentadores, embora neste trabalho seja apresentada somente a análise de sete destes alimentadores, pertencentes à **Detroit Edison**, que suprem clientes residenciais e industriais. As características básicas do trabalho são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Características básicas dos alimentadores utilizados no estudo

Nome	Número de		Demanda		Tipo
	Cons.	Trafo	Verão	Inver.	
RESIDENCIAL					
Crawford	1018	124	3762	1978	Residencial
Bergen	391	157	908	1204	Residencial
Hickory	140	15	890	341	Residencial
COMERCIAL					
Crawford	8	4	1191	820	Shopping Center
Disco	4	4	1039	842	Shopping Center
INDUSTRIAL					
Lombard -1	77	122	3664	3095	Pequenas Indústrias
Lombard -2	24	28	2614	2237	Pequenas Indústrias

5.6.2 - Resultados

A eficácia da redução de tensão com objetivo de reduzir a demanda pode ser observado através da análise das curvas mostradas nas figuras 5.3 e 5.4. Estas figuras apresentam as curvas relativas às demandas médias anuais das potências ativa e reativa, para o caso do alimentador residencial Bergen.

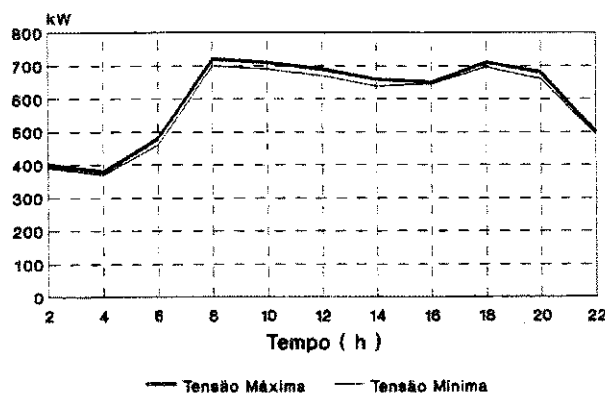


Figura 5.3 - Demanda (kW) média diária do alimentador residencial Bergen, considerando a média anual.

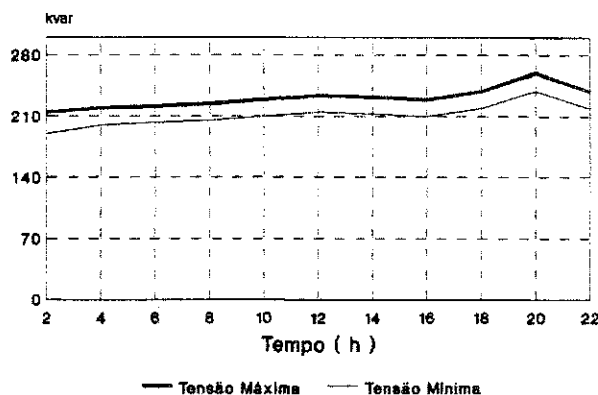


Figura 5.4 - Demanda (kvar) média diária do alimentador residencial Bergen, considerando a média anual.

A tabela 5.3 apresentam-se os valores estimados da variação das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão e os valores correspondentes relativos à representação da carga em duas parcelas, uma correspondente à impedância constante e outra à potência constante, com a aplicação da equação (5.17).

Tabela 5.3 - Variação média anual das potências ativa e reativa com relação à variação de tensão e percentuais relativos a representação da carga.

Nome	DP/DV	DQ/DV	Representação da Carga			
			ATIVA %		REATIVA %	
			Z	P	Z	P
RESIDENCIAL						
Crawford	0,96	2,30	47,8	52,2	114,9	-
Bergen	0,97	3,84	48,3	51,7	191,5	-
Hickory	1,11	3,26	54,7	45,3	162,2	-
COMERCIAL						
Crawford	0,80	3,98	39,8	60,2	> 100	-
Disco	0,75	5,09	37,3	62,7	>100	-

(conclusão)

Nome	DP/DV	DQ/DV	Representação da Carga			
			ATIVA %		REATIVA %	
			Z	P	Z	P
INDUSTRIAL						
Lombard -1	0,83	4,45	41,3	58,7	> 100	-
Lombard -2	0,50	3,58	24,9	75,1	> 100	-

As variações máximas e mínimas das potências ativa e reativa com relação às variações nas tensões são apresentadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores máximos e mínimos da variação das potências ativa e reativa com relação à variação da tensão aplicada.

ALIMENTADOR	DP / DV	DQ / DV
Residencial	(0,96 - 1,11)	(2,30 - 3,84)
Comercial	(0,75 - 0,80)	(3,98 - 5,09)
Industrial	(0,50 - 0,83)	(3,58 - 4,45)

Na tabela 5.5 apresentam-se os valores médios da variação anual das potências ativa e reativa com a tensão e de percentuais da representação da carga contidos na tabela 5.4.

Tabela 5.5 - Valores médios da variação anual das potências ativa e reativa em relação à variação de tensão e percentuais relativos à representação da carga.

Nome	DP/DV	DQ/DV	Representação da Carga			
			ATIVA %		REATIVA %	
			Z	P	Z	P
RESIDENCIAL	1,04	3,07	51,7	48,3	152,7	-
COMERCIAL	0,78	4,54	38,6	61,4	225,9	-
INDUSTRIAL	0,67	4,02	33,1	66,9	200,0	-

5.7 - Modelos Utilizados

Considerando a ausência de informações sobre a modelagem de carga dos alimentadores de sistemas de distribuição da região Norte-Nordeste, objeto do estudo, a modelagem utilizada ao longo deste trabalho está de conformidade com a experiência apresentada no item anterior, onde procura-se, com a sensibilidade dos engenheiros de Planejamento e Operação, caracterizar a carga do alimentador que se deseja estudar. Isto não causa nenhum problema, uma vez que nos estudos de planejamento, sempre que possível, aglutinam-se as cargas de mesma natureza para serem supridas pelo mesmo alimentador. Portanto, as equações (5.11) e (5.12) podem ser escritas conforme tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Modelagem de carga usada no trabalho

Nome	Potência Ativa	Potência Reativa
RESIDENCIAL	$P(V) = P_0(0,51 + 0,49V^2)$	$Q(V) = Q_0V^2$
COMERCIAL	$P(V) = P_0(0,39 + 0,61V^2)$	$Q(V) = Q_0V^2$
INDUSTRIAL	$P(V) = P_0(0,33 + 0,67V^2)$	$Q(V) = Q_0V^2$

CAPÍTULO 6

APLICAÇÕES

6.1 - Introdução

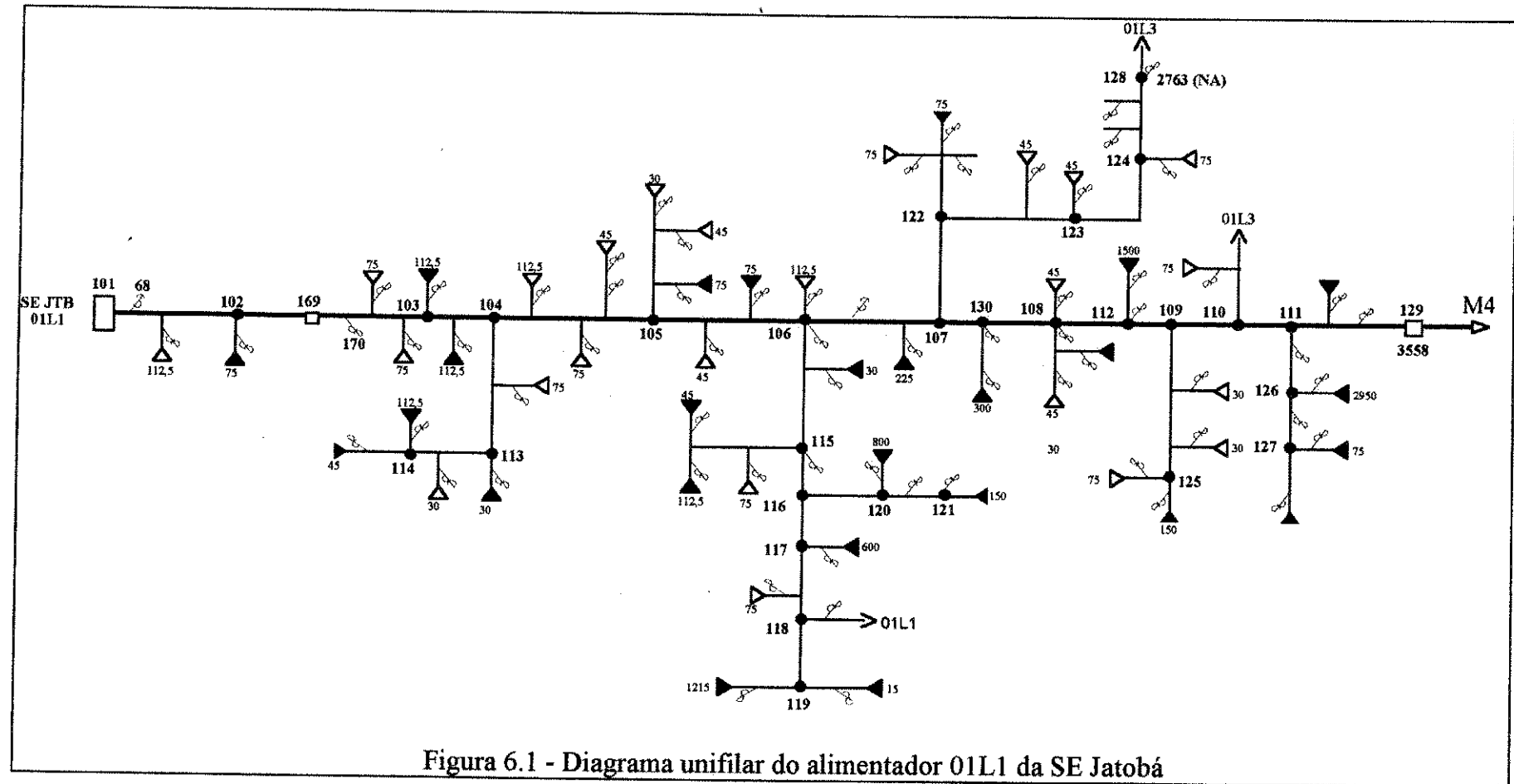
Neste capítulo serão apresentadas todas as etapas necessárias para se realizar o processo de simulação de um alimentador de distribuição, utilizando os programas de Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos, Montador de arquivos de dados e demais programas auxiliares.

6.2 - Etapas do Processo

6.2.1 - Aplicação do Programa Montador

O processo de formação do arquivo de dados para aplicação em programas de fluxo de potência se divide em três etapas: composição dos dados gerais do sistema, dados de linha e dados de barra. Nesta seção será detalhada a formação das duas últimas etapas, já que a primeira não apresenta qualquer dificuldade.

A seguir será apresentado um exemplo completo do processo de simulação utilizando o alimentador de distribuição 01L1 da subestação Jatobá - 13.8 kV (01L1_JTB). A figura 6.1 mostra o diagrama unifilar deste alimentador.



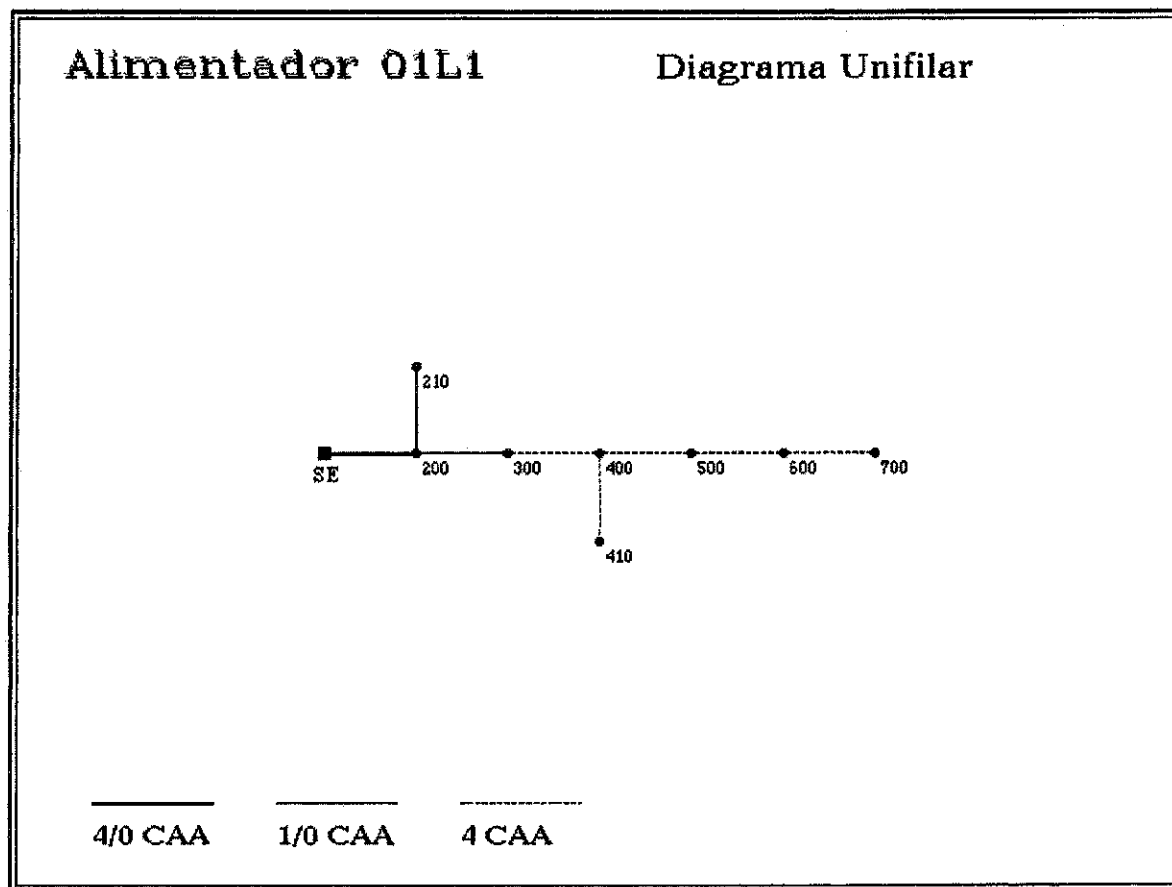


Figura 6.2 - Diagrama de barras do alimentador 01L1 da SE Jatobá

Em primeiro lugar, com o auxílio do diagrama unifilar do sistema que se deseja analisar, determina-se o local das barras obedecendo os critérios apresentados no capítulo 4. Em seguida forma-se o diagrama de barras (ver figura 6.2 na página anterior), conforme procedimento descrito a seguir:

A tabela 6.1 mostra a composição dos dados de barra do alimentador 01L1 da subestação Jatobá. Para cada barra são especificadas as potências em kVA dos transformadores de distribuição urbana e rural. Para os consumidores do Grupo A (tensão de fornecimento superior a 2,3kV) que dispõem de medição de demanda são especificados este valor e o respectivo fator de potência.

Tabela 6.1 - Composição dos dados de barra

Nº da barra	Nome da barra	kVA urbano	kVA rural	kVA grupo A	kW grupo A	FP grupo A	Banco capacitores
100	SE						
200	200						
210	210			2x500 1x75	560	0,9	
300	300	12x30 9x45 5x75 1x112,5		2x112,5	180	0,9	
400	400	1x15 1x45 2x75 1x112,5	5x15 7x30	1x150	115	0,9	
410	410		10x15 3x30 2x45				
500	500	2x30 2x45 3x75	6x15	2x112,5 1x225	250		

(conclusão)

Nº da barra	Nome da barra	kVA urbano	kVA rural	kVA grupo A	kW grupo A	FP grupo A	Banco capacitores
600	600	2x30 2x45 1x75	2x30 6x15 1x45				
700	700	1x30 3x45 1x75	5x15 1x30				

A partir da tabela 6.1 e conhecendo-se os fatores de diversidade do conjunto de consumidores do Grupo A e de utilização dos transformadores das zonas urbana e rural determina-se os dados de barra (potências ativa e reativa). Este procedimento é realizado através da aplicação do programa montador (Monta), já apresentado no capítulo 4. Os fatores de diversidade e de utilização empregados neste exemplo estão apresentados na tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Fatores de Diversidade e de Utilização

Descrição		Valores
Fator de diversidade		1,2
Fator de utilização	Urbano	0,8
	Rural	0,25

Após a utilização do programa Monta são gerados três arquivos com as seguintes terminações: .DBF, .DAT e .UNI.

O .DBF é um arquivo criado pelo programa Monta onde se processam as alterações dos dados. O arquivo .DAT será usado pelo programa de fluxo de

potência para efetuar os cálculos e o arquivo .UNI será usado pelo programa Unif para desenhar os diagramas unifilares.

A figura 6.3 apresenta o arquivo de dados L1JTB.DAT, apenas para a situação de carga máxima, gerado a partir do programa Monta.

```

7 100 200 300 400 500 600 700
CASO1      3              3011.69          1458.63
01L1 - SE JATOB
99 0.0000010 0.0000010 0.0050000 >>> TOLERANCIAS DP,DQ,DV
  1.90440 13.80000 100.00000 >>> BASES : IMPEDANCIA, TENSAO E POTENCIA
  8 ----> NUMERO DE LINHAS
100 200      193.18 237.98 0.00 0.0 0.00.000 4/0 CAA      10.00
200 210      164.35 117.80 0.00 0.0 0.00.000 1/0 CAA      4.50
200 300      255.87 183.27 0.00 0.0 0.00.000 1/0 CAA      7.00
300 400      332.61 104.49 0.00 0.0 0.00.000 4 CAA        4.00
400 410      249.46 78.37 0.00 0.0 0.00.000 4 CAA        3.00
400 500      166.30 52.25 0.00 0.0 0.00.000 4 CAA        2.00
500 600      249.46 78.37 0.00 0.0 0.00.000 4 CAA        3.00
600 700      332.61 104.49 0.00 0.0 0.00.000 4 CAA        4.00
      FIM DOS DADOS DE LINHA
  9 ----> NUMERO DE BARRAS
100  2 SE EXEMPLO 1.00              0.0      0.00      0.00 50 100
      0.0
200  0 200      1.00              0.0      0.00      0.00 50 100
      0.0
300  0 300      1.00              1477.5 1051.80 509.41 50 100
      0.0
400  0 400      1.00              757.5 392.16 189.93 50 100
      0.0
210  0 210      1.00              1075.0 466.67 226.02 50 100
      0.0
410  0 410      1.00              330.0 74.25 35.96 50 100
      0.0
500  0 500      1.00              915.0 498.58 241.47 50 100
      0.0
600  0 600      1.00              420.0 205.88 99.71 50 100
      0.0
700  0 700      1.00              345.0 196.43 95.13 50 100
      0.0
>>>>>>>>>>>> FIM DOS DADOS DE BARRA
0.200      2.000

```

Figura 6.3 - Dados gerados a partir do programa Monta.

6.2.2 - Aplicação do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos

Nesta seção será apresentada a aplicação do programa de fluxo de potência baseada no método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos (Fluxo) para simulação do alimentador 01L1 da subestação Jatobá - 01L1_JTB.

Foram processados quatro casos do alimentador exemplo, na situação de carga máxima. A modelagem de carga utilizada foi 50% impedância constante para a potência ativa e 100% impedância constante para a potência reativa, conforme descrição a seguir:

- Caso 1: Situação atual do alimentador;
- Caso 2: Instalação de um banco de capacitores na barra 300 de 900 kvar;
- Caso 3: Instalação de um banco de reguladores monofásicos em delta aberto (10 %, 200A) a aproximadamente 10km da subestação Jatobá;
- Caso 4: Junção dos casos 2 e 3.

A figura 6.4 apresenta os dados do alimentador exemplo com os dados das barras ajustados e o nome do arquivo L1JTB.NEW criado pelo programa Fluxo.

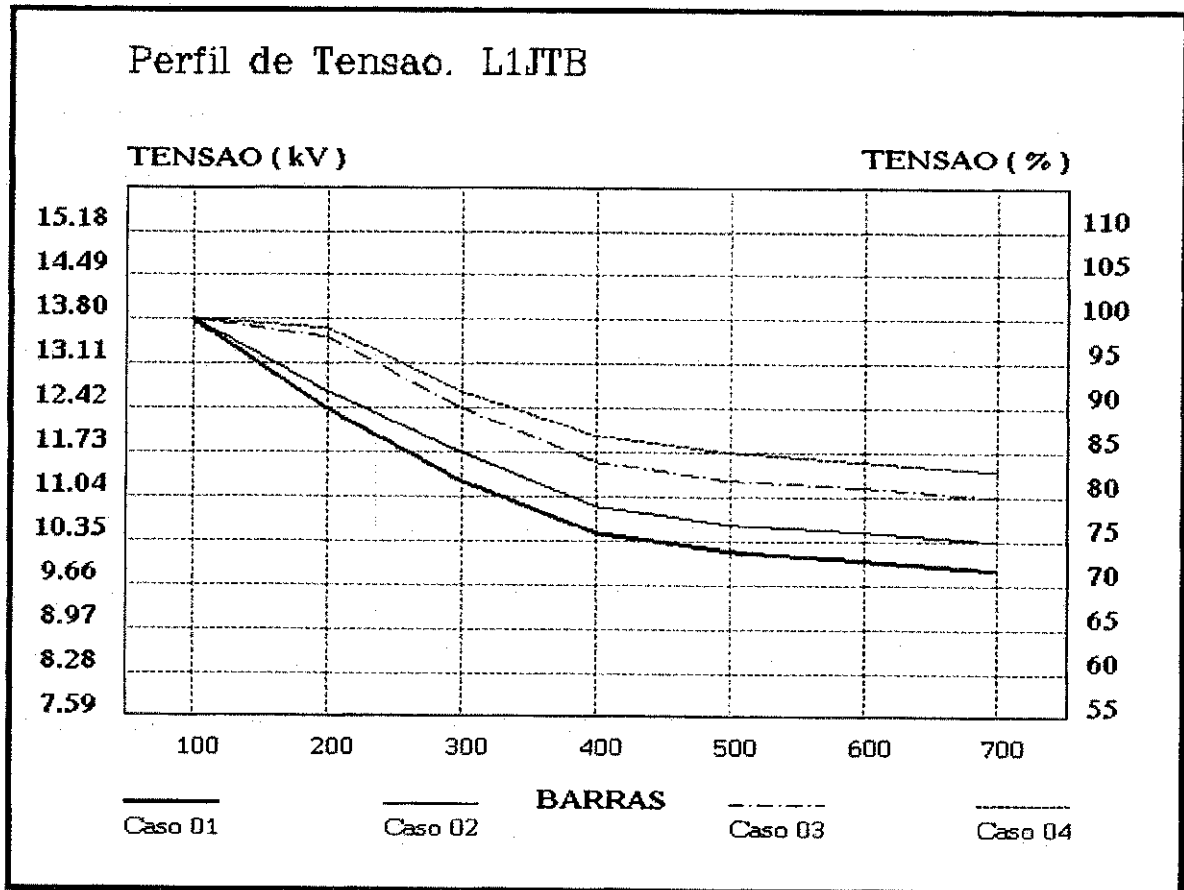


Figura 6.5 - Resultado do perfil de tensão do alimentador 01L1 da SE Jatobá

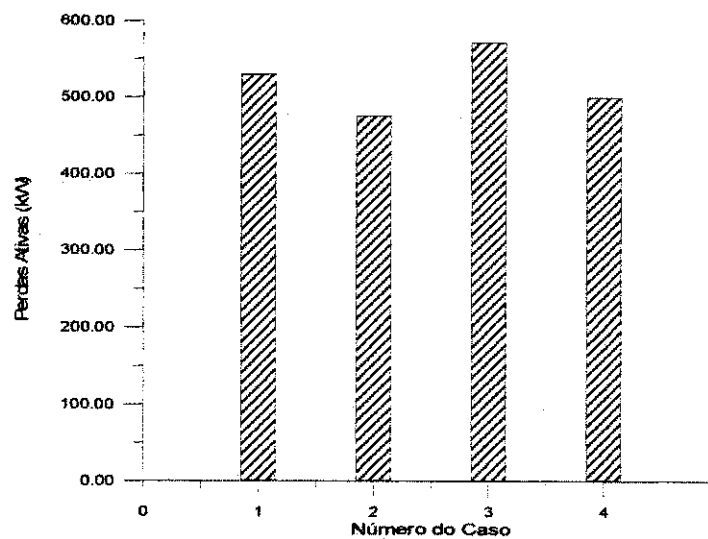


Figura 6.6 - Perdas ativas do alimentador 01L1_JTB.

Observa-se que, quando da instalação do banco de capacitores (caso 2) o perfil de tensão melhora em relação ao caso base (caso 1), com reflexo na redução das perdas em 10,3%.

Quando da instalação do banco de reguladores (caso 3), o perfil de tensão apresenta uma melhoria acentuada, porém as perdas aumentam em 8,0% em relação ao caso base.

Finalmente, quando da instalação dos bancos de capacitores e reguladores ao mesmo tempo (caso 4), percebe-se uma melhoria acentuada do perfil de tensão e a diminuição das perdas em 5,5% em relação ao caso base. Já em relação ao caso 3 a redução das perdas foi da ordem de 12,5%.

Os valores das perdas apresentados na análise anterior são verdadeiros para a modelagem de carga considerada. Os reflexos da melhoria de tensão repercutem de forma diferenciada nos sistemas de distribuição de acordo com a modelagem de carga. Isto será melhor tratado com exemplos na seção seguinte.

6.2.3 - Aplicação da Modelagem de Carga

O objetivo desta seção é ilustrar a influência da modelagem da carga nos resultados da simulação do fluxo de potência para os alimentadores de distribuição 01L2 da subestação Dona Inês 01L2_DIN e 01L1 da subestação Jatobá 01L1_JTB.

A figura 6.7 apresenta os resultados da simulação do alimentador 01L2 da subestação Dona Inês para vários modelos de cargas, conforme tabela 6.3. Foi escolhida a barra 22 (Jacaraú) para se comparar os valores de tensão medido e simulado através do fluxo de potência, utilizando a modelagem tipo 3, considerada a mais adequada para este alimentador.

No anexo II, apresenta o valor da tensão na barra 22 (Jacaraú) na curva 3 de 9,85 kV, ou 167 V fase-neutro, no lado da baixa tensão do transformador de distribuição, com "tap" de 12.600/220 V e considerando uma queda de tensão de 3% no transformador de distribuição. Os valores medidos na rede de distribuição de Jacaraú, utilizando-se um medidor eletrônico com memória, adequado para medições do tipo operacional variou de 163V a 173V (ver exemplo do perfil de tensão na figura 6.8), nas mesmas condições da simulação, ou seja, carga máxima.

Portanto, o erro cometido entre os valores simulado e medido variou na faixa de -3,47 a 2,45%, valores estes por demais aceitáveis.

Tabela 6.3 - Resultado da aplicação da modelagem de carga - 01L1_DIN

Tipo	P(V)		Q(V)		Perda ativa (%)	N° de iteração
	Impedância cte (%)	Potência cte (%)	Impedância cte (%)	Potência cte (%)		
1	0	100	100	0	32,9	14
2	50	50	50	50	22,9	7,5
3	50	50	100	0	22,8	6.5
4	100	0	100	0	21,5	6.5
5	0	100	0	100	-	NC

NC - não converge.

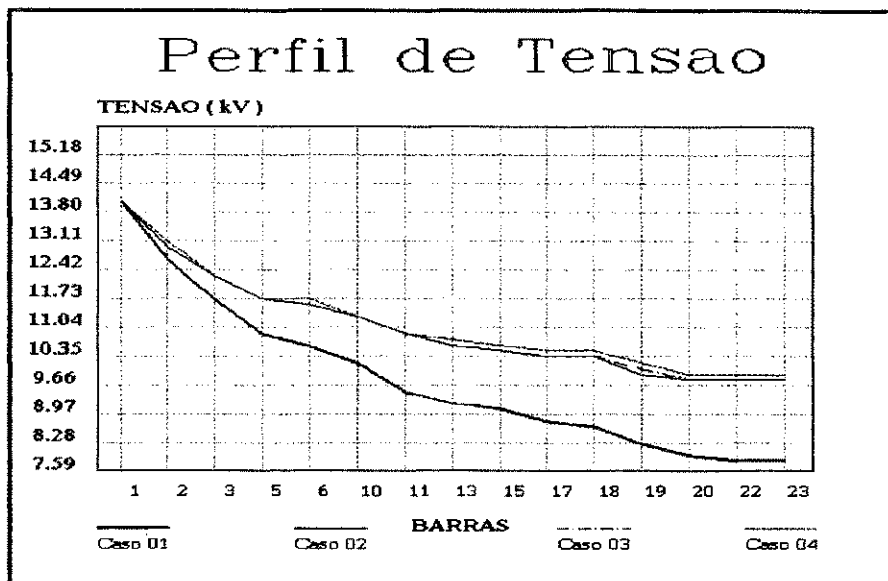


Figura 6.7 - Perfil de tensão para os casos apresentados na tabela 6.3

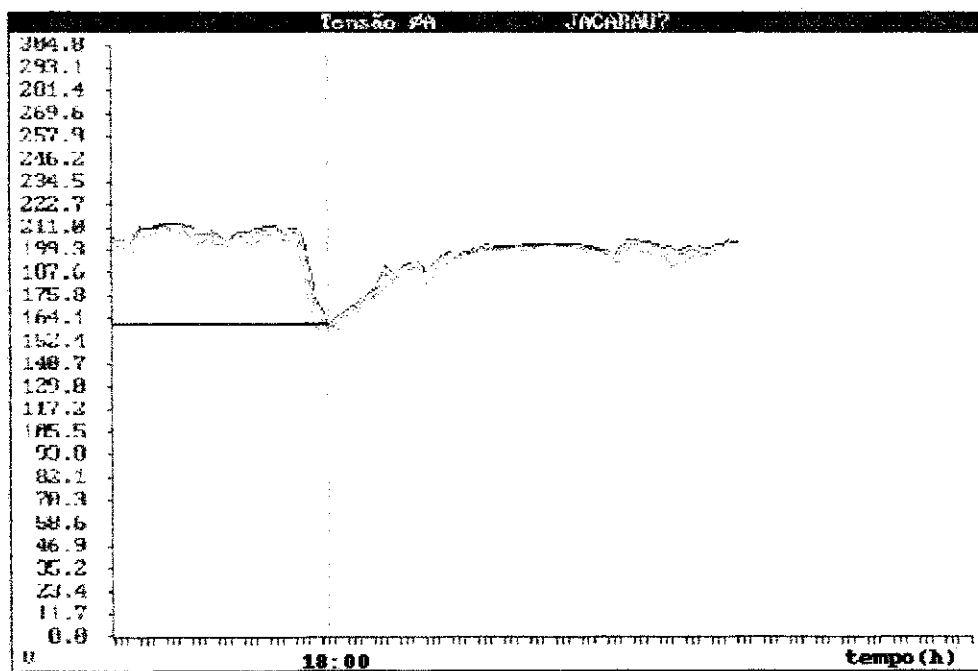


Figura 6.8 - Exemplo de valores de tensão encontrado na rede de distribuição de Jacaraú.

Na figura 6.9 apresentam os resultados das perdas ativas do alimentador 01L1_JTB para o caso base (caos 1) considerando os mesmos modelos de carga mostrados na tabela 6.3. Estas perdas foram determinadas antes e depois da instalação de um banco de capacitores de 900 kvar na barra 300.

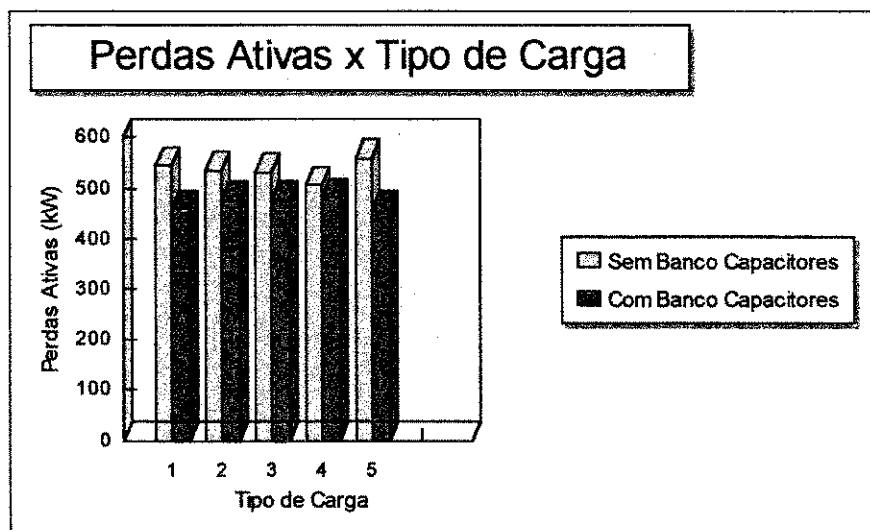


Figura 6.9 - Perdas ativas versus tipo de carga - 01L1_JTB

Observa-se portanto, que o reflexo da melhoria da tensão nas perdas do alimentador com instalação do banco de capacitores se processa de forma diferenciada.

Os resultados apresentados anteriormente, demonstram claramente a importância da modelagem da carga na simulação dos sistemas de potência, onde o desconhecimento da natureza da carga pode levar a resultados imprecisos ou mesmo a acreditar na inexistência de solução das equações de fluxo de potência, quando da não convergência do processo iterativo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Os métodos convencionais apresentam um baixo desempenho em relação à velocidade de convergência e à confiabilidade para sistemas de distribuição que apresentam alta relação R/X.

Os métodos Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos e o da Soma de Potências apresentam uma boa performance em todos os casos analisados.

O desenvolvimento de um procedimento para facilitar o processo de montagem dos arquivos de dados de forma rápida e segura, trouxe o aumento da produtividade para as áreas envolvidas.

Quanto à modelagem da carga, verificou-se que dependendo da sua representação, os resultados das simulações podem ser imprecisos ou mesmo sem convergência, comprometendo a análise do sistema elétrico.

A utilização do Fluxo de Potência conversacional demonstrou ser uma ferramenta poderosa para o planejamento e operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, onde verificou-se um alto poder de análise (saídas gráficas e modificações de dados de entrada durante o processamento).

Finalmente, este trabalho apresenta excelentes contribuições para as concessionárias de distribuição de energia, especialmente para a região Norte-Nordeste, na medida que apresenta alternativas para o aumento da produtividade

e melhoria da eficiência, contribuindo para a diminuição dos custos dos serviços para a sociedade.

Sugestões para trabalhos futuros:

Como forma de otimizar a entrada de dados do programa de fluxo de potência dos consumidores que dispõem de medição de demanda e fator de potência, sugere-se que estas informações sejam obtidas diretamente de um banco de dados disponível nas concessionárias, sem a interferência humana.

Sugere-se também a realização da experiência vivenciada pelas empresas norte-americanas em uma das concessionárias de energia elétrica da região Norte-Nordeste e comparar os resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] - BROADWATER, P.R. et alii. "Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems", Electric Power Systems Research Journal, Vol. 14, 1988.
- [2] - BROADWATER, P.R. et alii. "A Comparative Study of Three Radial Power Flow Methods", Proceedings of the IASTED International Symposium on High Technology in the Power Industry, Arizona, 1988.
- [3] - CARPENTIER, J. "Ordered Eliminations", Proc. Power System Computations Conference, London 1963.
- [4] - DECMANN, S. et alii. "Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 2292-2300, Nov./Dec. 1980.
- [5] - DESPOTOVIC, S.T.; BABIC, B.B. & MASTILOVIC, V.P. "A rapid and Reliable Method for Solving Load Flow Problems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp. 123-130, Jan./Feb. 1971.
- [6] - DYLIACO, T.E. & RAMARAO, K.A. "Discussion on Reference 31"
- [7] - ELLGERD, O.L. "Electric Energy Systems Theory", McGraw-Hill, 1970.
- [8] - GARCIA, A.V. et alii. "Automação da Distribuição de Energia Elétrica: Simulação utilizando o fluxo de Carga Desacoplado Rápido". 5º Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande-PB, pp. 256-261, Jul. 1984.

- [9] - GTE/SCEE/CCON. "Metodologia para Representação de Carga para Estudos em Regime Permanente", N° 741, Recife-PE, 1989.
- [10] - HANSON, J.R. "A New Procedure for Topologically Controlled Eliminations", Proc. Fourth Power System Computation Conference paper 1.3/6, Grenchle, Sep. 11-15, 1972.
- [11] - JOLISSAINT, C.H.; ARVANITIDIS, N.V. & LUENBERGER, D.G. "Decomposition of Real and Reactive Power Flows: A Method Suited for On-Line Applications", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp. 661-670, Mar./Apr. 1972.
- [12] - KERSTING, W.H. & MENDIVE, D.L. "An application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-phase Radial Load Flow Problems", IEEE Winter Power Meeting, New York, 1976.
- [13] - KRUPA, T.J. et alii. "The Effects of Reduced Voltage on Distribution Circuit Loads", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PWRS-2, N° 4, Nov/1987.
- [14] - PREISS, R.F. & WARNOCK, V.J. "Impact of Voltage Reduction on Energy and Demand", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PASS-97, pp. 1665-1671, Sep/Oct. 1978.
- [15] - RAJICIC, D. & BOSE, A. "A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, N° 2, pp. 743-746, May 1988.
- [16] - SATO, N. & TINNEY, W.F. "Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-82, pp. 944-950, Dec. 1963.

- [17] - SHIRMOHAMMADI, D. et alii. "A Compensation Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network", PICA Conference, 1987.
- [18] - STOTT, B. "Effective Starting Process for Newton-Raphson Load Flow", Proc. IEE, Vol. 118, pp. 983-987, Aug. 1971.
- [19] - STOTT, B. "Decoupled Newton Load Flows", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp. 1955-1957, Set./Oct. 1972.
- [20] - STOTT, B. & ALSAÇ, O. "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pp. 859-867, May/Jun. 1974.
- [21] - STOTT, B. "Review of Load-Flow Calculation Methods", Proc. IEEE Vol. 62, pp. 916-929, Jul. 1974.
- [22] - STOTT, B. & HOBSON, E. "Solution of Large Power-System Networks by Order Elimination: A comparison of Ordering Schemes", Proc. IEE, Vol. 118, pp. 125-136, Jan. 1971.
- [23] - TINNEY, W.F. & WALKER, J.W. "Direct Solution of Sparse Network Equation by Optimally Ordered Triangular Factorization", Proc. IEEE, Vol. 55, pp. 1801-1809, Nov. 1967.
- [24] - TINNEY, W.F.; POWELL, W.L. & PETERSON, N.M. "Sparsity-Oriented Network Reduction", IEEE PICA Conference Proceedings, Minneapolis, pp. 320-384, Jul. 1973.
- [25] - TINNEY, W.F. & HART, C.E. "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS. 86, pp. 1449-1460, Nov. 1967.

- [26] - TINNEY, W.F.; POWELL, W.L. & WALKER, J.W. "Programming of Sparsity-Direct Ordering Schemes", Proc. Fifth Power System Computer Conference, paper 3.1/1 Cambridge, 1975.
- [27] - VAN NESS, J.E. & GRIFFIN, J.H. "Elimination Methods for Load Flow Studies", AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 80, pp. 299-304, Jun. 1961.
- [28] - WU, F.F. "Theoretical Study of the Convergence of the convergence of the Fast Decoupled Load Flow", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, pp. 268-275, Jan./Feb. 1977.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- [1] - BARBOSA, A.S. et alii. "Aspectos Práticos sobre a Utilização de Programas de Fluxo de Carga em Sistemas de Distribuição com Configuração Radial", XI SENDI, Blumenau-SC, Set. 1992.
- [2] - BARBOSA, A.S. et alii. "Estudo Comparativo sobre Avaliação das Perdas Elétricas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", II CPDE, Recife-PE, Out. 1993.
- [3] - BRITTON, J.P. "Improved Area Interchange Control for Newton's Method Load Flow", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pp. 1577-1581, Oct. 1969.
- [4] - BRITTON, J.P. "Improved Load Flow Performance Through a More General Equation Form", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -90, pp. 109-114, Jan. 1971.
- [5] - CESPEDES. R. "New Method for the Analisis of Distribution Networks", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 5, Nº 1, pp. 391-396, Jan. 1990
- [6] - CORDEIRO, A.A. "Modelo Alternativo para Análise do Sistema Primário de Distribuição", SAELPA, Publicação Interna, João Pessoa-PB, Dez. 1988.
- [7] - DOMMEL, H.W.; TINNEY, W.F. & POWELL, W.L. "Further Developments in Mewton's Method for Power System Applications", paper 70CP-161-PWR presented at the 1970 IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., Jan. 25-30, 1970.

- [8] - ELABIAD, A.H. & STAGG, G.W. "Computer Methods in Power System Analysis, McGraw-Hill, 1968.
- [9] - GONEN, T. "Electric Power Distribution System Engineering", Singapore, McGraw-Hill, 1987.
- [10] - HORISBERGER, H.P.; RICARD, J.C. & ROSSIER, C. "Fast Decoupled Static State-Estimator for Electric Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, pp. 208-215, Jan./Feb. 1976.
- [11] - KASTURI, R. & POTTI, M.S.N. "Piecewise Newton-Raphson Load Flow - An Exact Method Using Ordered Elimination", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, pp. 1244-1253, Jul./Aug. 1976.
- [12] - MACEDO, W.E. et alii. "Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Utilização nos Sistemas Primários e Secundários", XII SENDI, Recife-PE, Out. 1994.
- [13] - PETERSON, N.M. & MEYER, W.S. "Automatic Adjustment of Transformer and Phase Shifter Taps in the Newton Power Flow", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103-106, Jan. 1971.
- [14] - PETERSON, N.M.; TINNEY, W.F. & BREE, D.W. "Iterative Linear AC Power Flow Solution for Fast Approximate Outage Studies", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, pp. 2048-2053, Sep./Oct. 1972.

- [15] - SACHDEV, M.S. & MEDICHERLA, T.K.P. "A Second Order Load Flow Technique", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, pp. 189-197, Jan./Feb. 1977.
- [16] - TINNEY, W.F. & POWELL, W.L. "Comparison of Matrix Inversion and Sparse Triangular Factorization for Solution of Power Network Problems", Proc. Joint Romania - U. S. Research Seminar pp. 90-100, Bucharest, Jun. 1974
- [17] - TINNEY, W.F. & MEYER, W.S. "Solution of Large Sparse Systems by Ordered Triangular Factorization", IEEE Transaction (Automatic Control), Vol. AC-18, pp. 233-246, Aug. 1973.
- [18] - TINNEY, W.F. & PETERSON, N.M. "Steady State Security Monitoring", Proc. Symposium on real time control of elec. power systems, Brown, Boveri & Comp. Ltd. Baden, Switzerland, 1971.
- [19] - UEMURA, K. "Power Flow Solutions by a Z-matrix Type Method and its Application to Contingency Evaluation", PICA Conference Record, p. 386, May 1971.
- [20] - UEMURA, K. "Approximated Jacobians in Newton's Power Flow Method", Proc. Power System Computation Conference, paper 1.3/2, Set. 1972.

ANEXO I

SISTEMA COMPUTACIONAL

I.1 - Introdução

Apresenta-se neste anexo um sistema computacional desenvolvido para facilitar o processo de simulação e análise dos SDEEs. Fazem parte deste sistema os programas Monta (monta arquivo de dados - ver detalhes no capítulo 4), Fluxo (fluxo de potência), Perfil (desenha o perfil de tensão), Junta (auxilia na junção de diversos arquivos com valores de tensão) e Unif (desenha o diagrama unifilar).

I.2 - Programa Fluxo

O programa conversacional de fluxo de potência é baseado no método Desacoplado Rápido e pode utilizar opcionalmente a técnica de Rotação de Eixos. O programa foi desenvolvido em "Fortran" e permite a simulação de até duzentas barras e duzentos ramos.

I.2.1 - Entrada de Dados

Nesta seção serão apresentadas as telas relativas a entrada dos dados necessários para o processo de simulação dos sistemas de distribuição.

As figura I.1 a I.5 apresentam as telas que facilitam a utilização do programa e em seguida serão apresentados comentários sobre cada uma delas.

1. Arquivo de dados:

Deve ser digitado o nome do arquivo de dados.

2. Alteração nos dados do sistema:

No caso de desejar-se alterar os dados constantes do arquivo de dados digita-se o número 2.

rede. O programa cria um arquivo com os dados ajustados, cujo nome é L1JTB.NEW, conforme exemplo apresentado no capítulo 6.

❑ 6. Carregamento mínimo:

Esta opção informa ao programa o valor mínimo do percentual de carregamento de cada trecho que deve ser armazenado no arquivo chamado L1JTB.CAR. Por exemplo: Se for digitado o número 30, o arquivo formado pelo programa conterà apenas informações sobre os trechos da rede cujo carregamento for igual ou superior a 30 %.

❑ 7. Fim

No caso de ter sido feita a opção 2 (Alterar dados do sistema), a segunda tela exibirá as quatro alternativas mostradas na figura I.2 que serão comentadas a seguir:

Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Conversacional	
Data : 29-11-1995	
Hora : 23:43:02.28	
ALTERAÇÃO DE DADOS	
1. Capacitores/Indutores Shunt.	2. Regulador da Tensão.
	3. Fim.
OPÇÃO : []	
Fluxo de Potência LSPFP - Versão 3.11	UEPB/CCT/DEE/LSP

Figura I.2 - Alterar dados do sistema


```

Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Conversacional
Data : 02-12-1995
Hora : 10:20:23.94

INTRODUZIR REGULADOR

Número do Trecho Para Introduzir Regulador : 1

Regulador Localizado Entre as Barras 100 SE JTB e 900 REGULAD

Digite : Número da Barra do Regulador : 900

Fluxo de Potência LSPFP - Versão 3.11 UFPb/CCT/DEE/LSP

```

Figura - I.4 - Dados da rede para instalação do banco de reguladores.

```

Fluxo de Potência Desacoplado Rápido Conversacional

DADOS DO REGULADOR PARA PROCESSAMENTO

Valor do Tap do Regulador em % : 100

Tensao Controlada em (pu) : 1

Tap Minimo Admissivel (%) : 90

Valor da Impedancia do Regulador (%) :

Resistência = Reatância = 3.0

Fluxo de Potência LSPFP - Versão 3.11 UFPb/CCT/DEE/LSP

```

Figura I.5 - Dados sobre o banco de reguladores

⇒ Valor do "tap" do regulador:

Por exemplo: Valor inicial do "tap" 100%.

⇒ Impedância (%)

Indicar o valor da resistência (%), em geral considera-se zero . O valor da reatância pode ser considerado igual a 3%, caso não se disponha do valor exato.

Indicadas estas informações aparecerá a tela apresentada na figura I.2. Deste modo deve-se digitar a número 3 para iniciar o processamento.

A seguir serão apresentados comentários explicativos sobre o arquivo de dados do sistema exemplo mostrado na figura 6.4:

a) Informações para traçar o perfil de tensão ao longo da rede:

⇒ Número de barras (7) que serão usadas para traçar o perfil de tensão.

⇒ Números das barras indicadas para que seja traçado o perfil de tensão.

7 100 102 300 400 500 600 700

b) Informações sobre:

⇒ Número do caso que será simulado.

⇒ Duração (horas) do nível de demanda considerado na simulação.

⇒ Número de casos que serão analisados de cada vez.

⇒ Valor da potência ativa (kW) medida na entrada da rede.

⇒ Valor da potência reativa (kvar) medida entrada da rede.

CASO1 3 1 3011.69 1458,63

c) Informação sobre o nome do rede e subestação:

01L1 - SE JATOB

d) Informações sobre:

⇒ Número máximo de iterações.

⇒ Tolerância de potência ativa, reativa e tensão.

99 0.0000010 0.0000010 0.0050000 >>> TOLERÂNCIAS DP,DQ,DV

e) Informações sobre :

⇒ Impedância base (O H M S)

⇒ Tensão base (k V)

⇒ Potência base (M V A)

1.90440 13.80000 100.0000 >>> BASES : IMPEDÂNCIA, TENSÃO
E POTÊNCIA

A seguir serão apresentados comentários sobre os blocos de dados relativos aos dados de linhas e transformadores, bem como aos dados de barras:

f) Informações sobre as linhas e transformadores:

⇒ Número de linhas.

⇒ Nós: inicial e final.

⇒ Resistência (%) e reatância (%) .

⇒ Seção transversal do condutor e comprimento (km) do trecho .

g) Informações sobre as barras:

⇒ Número de barras;

⇒ Número de cada barra;

- ⇒ Código da barra;
- ⇒ Barra de balanço ⇒ 2;
- ⇒ Barra de carga ⇒ 0;
- ⇒ Tensão na barra em P U;
- ⇒ Potência Instalada na barra (kVA);
- ⇒ Potência ativa (kW) e reativa(kvar) na barra;
- ⇒ Valores relativos a representação da carga:

Percentual de potência ativa representado por impedância constante. O número 50 significa que 50% da demanda de potência ativa na barra serão representados como impedância constante. A parcela restante é considerada potência constante. A representação da demanda de potência reativa é feita de modo semelhante. No exemplo em questão, a potência reativa está sendo representada totalmente por impedância constante.

h) Informações relativas ao processo de convergência:

Se durante o processo de convergência o valor do módulo da tensão assumir valor inferior a 0.2 ou superior a 2.0 o processo de convergência é interrompido, pois em ambos os casos a experiência mostra que o processo não convergirá mais e deste modo evita-se cálculos desnecessários e economiza-se tempo.

0.200 2.000

I.2.2 - Arquivos gerados pelo programa Fluxo

O programa Fluxo produz cinco arquivos para facilitar a análise dos resultados. Os nomes destes arquivos começam com o mesmo nome do arquivo

de dados e a extensão é que difere, de acordo com seu conteúdo. Tomando o nome do arquivo de dados L1JTB.NEW apresentado no capítulo 6, tem-se:

a) Arquivo L1JTB.SAI

Arquivo contendo todos os dados e resultados mostrados a seguir:

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:00:58 Pagina 001 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I
I DADOS GERAIS DO SISTEMA I
-----I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I N_barra I N_linha I N_trafo I N_Capacitor I N_Reator I Tipo de barra I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 9 I 8 I 0 I 0 I 0 I PQ 8 I PV 0 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Carga Total do Sistema I Potencia Base I Tensao Base I Z_Base I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 3013.4 KW I 1564.0 KVAr I 100.0 MVA I 13.8 KV I 1.9 OHMs I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Tolerancias de Potencia I Tolerancia de Tensao I N_Iteracoes I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I .0000010 DP I .0000010 DQ I .0050000 pu I 99 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Limites de Tensao : Maximo = 2.0 pu Minimo = .2 pu I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Rotacao de Eixos : ATIVADA - Angulo de Rotacao = 40.0 Graus I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I ARQUIVOS UTILIZADOS DURANTE O PROCESSAMENTO I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Arquivo de dados : l1jtb1 .NEW I
I Arq Geral de Saida : l1jtb1 .SAI I
I Arq de saida (RESUMO) : l1jtb1 .RES I
I Arq p/ Perfil de Tensao: l1jtb1 .TEN I
I Arq c/ Resumo de Perdas: l1jtb1 .PER I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:00:58 Pagina 002 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I

```

(continuação)

```

-----I
I      D A D O S   D E   L I N H A S   E   T R A N S F O R M A D O R E S   I
-----I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I DA      I PARA      I Resist      I X_serie      I B_shunt      I          I          I
I BARRA   I BARRA   I   pu        I   pu        I   VA        I   TAP        I Cabo        I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 100 I 200 I 1.9318 I 2.3798 I .0000 I .0000 I I4/0 CAA I
I 200 I 210 I 1.6435 I 1.1780 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I 200 I 300 I 2.5587 I 1.8327 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I 300 I 400 I 3.3261 I 1.0449 I .0000 I .0000 I I4 CAA I
I 400 I 410 I 2.4946 I .7837 I .0000 I .0000 I I4 CAA I
I 400 I 500 I 1.6630 I .5225 I .0000 I .0000 I I4 CAA I
I 500 I 600 I 2.4946 I .7837 I .0000 I .0000 I I4 CAA I
I 600 I 700 I 3.3261 I 1.0449 I .0000 I .0000 I I4 CAA I
-----I

```

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:00:58 Pagina 003 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I
I      D A D O S   D E   B A R R A   I
-----I
I      I      I TENSÃO I ANG I      I      I S_inst I P_car I Q_car I
I BARRA I NOME I pu I GR I F_pot I F_car I KVA I KW I KVar I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 200 I 200 I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I 210 I 210 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 1075.0 I 487.3 I 252.9 I
I 300 I 300 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 1477.5 I 1098.3 I 570.0 I
I 400 I 400 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 757.5 I 409.5 I 212.5 I
I 410 I 410 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 330.0 I 77.5 I 40.2 I
I 500 I 500 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 915.0 I 520.6 I 270.2 I
I 600 I 600 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 420.0 I 215.0 I 111.6 I
I 700 I 700 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 345.0 I 205.1 I 106.5 I
I 100 I SE EXEMP I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
-----I

```

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:00:58 Pagina 004 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I
I TABELA DOS NUMEROS DOS TRECHOS DO ALIMENTADOR, NUMEROS E NOMES DAS BARRAS I
-----I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I N_TRECHO I DA BARRA I PARA BARRA I N_TRECHO I DA BARRA I PARA BARRA I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 1 I 100 SE EXE I 200 200 I 2 I 200 200 I 210 210 I
I 3 I 200 200 I 300 300 I 4 I 300 300 I 400 400 I
I 5 I 400 400 I 410 410 I 6 I 400 400 I 500 500 I
I 7 I 500 500 I 600 600 I 8 I 600 600 I 700 700 I
-----I

```

(continuação)

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:03:48 Pagina 005 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I
I Resultados da Simulacao Estatica de Sistemas de Potencia I
-----I
I Tempo de Simulacao : 00:00:00.00 I
I Numero de Iteracoes : 7.5 I
-----I
I Relatorios de Saida I
-----I
I 1 - Tensoes e Fluxos de Potencia - Solicitado I
I 2 - Tensoes e Perdas nos Trechos - Solicitado I
I 3 - Geracao, Barra e Elementos Shunt - Solicitado I
I 4 - Transformadores - Solicitado I
-----I

```

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:03:48 Pagina 006 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I
I DADOS DE BARRA I
-----I
I Barra de Swing - Barra numero: 100 Localizacao : SE EXE I
-----I
-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I I GERACAO - KVA I CARGA - KVA I ELEMENTOS SHUNT I
-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Bus I Nome I P-Ger I Q-Ger I P-Load I Q-Load I Reat/Cap I
I I I KWatt I KVar I KWatt I KVar I KVar I
-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 200I 200 I .0 I .0I .0 I .0 I .0 I
I 210I 210 I .0 I .0I 440.0 I 484.9 203.8 I .0 I
I 300I 300 I .0 I .0I 920.8 I 998.4 385.8 I .0 I
I 400I 400 I .0 I .0I 325.3 I 348.6 125.2 I .0 I
I 410I 410 I .0 I .0I 61.5 I 65.9 23.6 I .0 I
I 500I 500 I .0 I .0I 406.4 I 433.8 151.6 I .0 I
I 600I 600 I .0 I .0I 165.9 I 176.6 60.6 I .0 I
I 700I 700 I .0 I .0I 157.0 I 166.9 56.6 I .0 I
I 100I SE EXE I 3007.5 I 1454.2I .0 I .0 I .0 I
-----I

```

(conclusão)

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 23/01/1996 21:03:48 Pagina 007 I
-----I
I TITULO : 01L1 - SE JATOB CASO 1 I
-----I
I TENSOES NAS BARRAS I FLUXOS DE POTENCIA I
-----I
I Bus I Nome I Tensao I Angulo I Bus I Nome I P-Fluxo I Q-Fluxo I Corr I
I I I pu I Gr I I I I KWatt I KVAR I Amp I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 200I 200 I .908 I -2.74 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 210I 210 I .898 I -2.87 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 300I 300 I .823 I -4.12 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 400I 400 I .767 I -3.91 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 300I 300 I -1141.7 I -425.6I 66.43 I
I I 410I 410 I 61.6 I 23.6I 3.60 I
I I 500I 500 I 754.8 I 276.8I 43.83 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 410I 410 I .765 I -3.90 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 500I 500 I .749 I -3.85 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 400I 400 I -736.5 I -271.1I 43.83 I
I I 600I 600 I 330.1 I 119.4I 19.61 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 600I 600 I .737 I -3.81 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 500I 500 I -324.6 I -117.7I 19.61 I
I I 700I 700 I 158.8 I 57.1I 9.58 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 700I 700 I .729 I -3.78 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 600I 600 I -157.0 I -56.6I 9.58 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 100I SE EXE I 1.000 I .00 I I I I I I I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 200I 200 I 3007.5 I 1454.2I 139.76 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I
I Perdas Totais do Alimentador I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Ativas : 530.63 KWatt I Reativas : 447.20 KVAR I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```


b) Arquivo L1JTB.RES

Arquivo contendo apenas os principais resultados, mostrado a seguir:

```

-----I
I                                     CASO1                                     I
-----I
I Bar I Nome I V (pu) I Fase I Bar I Nome I P (kW) I Q(kVAr) I Cor(A) I
-----I
I 200I 200 I .908 I -2.74 I 210I 210 I 444.8 I 207.2I 22.60 I
I                                     I 300I 300 I 2347.1 I 981.5I 117.18 I
I                                     I 100I SE EXE I -2791.9 I -1188.7I 139.76 I
-----I
I 210I 210 I .898 I -2.87 I 200I 200 I -440.0 I -203.8I 22.60 I
-----I
I 300I 300 I .823 I -4.12 I 200I 200 I -2146.4 I -837.7I 117.18 I
I                                     I 400I 400 I 1225.6 I 451.9I 66.43 I
-----I
I 400I 400 I .767 I -3.91 I 300I 300 I -1141.7 I -425.6I 66.43 I
I                                     I 410I 410 I 61.6 I 23.6I 3.60 I
I                                     I 500I 500 I 754.8 I 276.8I 43.83 I
-----I
I 410I 410 I .765 I -3.90 I 400I 400 I -61.5 I -23.6I 3.60 I
-----I
I 500I 500 I .749 I -3.85 I 400I 400 I -736.5 I -271.1I 43.83 I
I                                     I 600I 600 I 330.1 I 119.4I 19.61 I
-----I
I 600I 600 I .737 I -3.81 I 500I 500 I -324.6 I -117.7I 19.61 I
I                                     I 700I 700 I 158.8 I 57.1I 9.58 I
-----I
I 700I 700 I .729 I -3.78 I 600I 600 I -157.0 I -56.6I 9.58 I
-----I
I 100I SE EXE I 1.000 I .00 I 200I 200 I 3007.5 I 1454.2I 139.76 I
-----I
I                                     Perdas Totais no Alimentador ( kW ) : 530.63 I
-----I

```

c) Arquivo L1JTB.CAR

Arquivo contendo as correntes e os percentuais de carregamento de cada trecho.

```

-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I RAMO I CABO I COMPRIM. I COR.MAX. I CORRENTE I CARREG. I
I I I ( Km ) I ( A ) I ( A ) I ( % ) I
-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 100 200 I 4/0 CAA I 10.00 I 340.00 I 139.76 I 41.11 I
-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 200 210 I 1/0 CAA I 4.50 I 230.00 I 22.60 I 9.83 I
-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

(conclusão)

I 200	300	I 1/0	CAA	I	7.00	I 230.00	I	117.18	I	50.95	I
I 300	400	I 4	CAA	I	4.00	I 140.00	I	66.43	I	47.45	I
I 400	410	I 4	CAA	I	3.00	I 140.00	I	3.60	I	2.57	I
I 400	500	I 4	CAA	I	2.00	I 140.00	I	43.83	I	31.31	I
I 500	600	I 4	CAA	I	3.00	I 140.00	I	19.61	I	14.00	I
I 600	700	I 4	CAA	I	4.00	I 140.00	I	9.58	I	6.84	I

d) Arquivo L1JTB.TEN

Arquivo contendo os valores das tensões nas barras para o caso base.

I 7 BAR	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	13.80	I
I 100	1.000	.000	.000	.000		I
I 200	.908	.000	.000	.000		I
I 300	.823	.000	.000	.000		I
I 400	.767	.000	.000	.000		I
I 500	.749	.000	.000	.000		I
I 600	.737	.000	.000	.000		I
I 700	.729	.000	.000	.000		I

e) Arquivo L1JTB.PER

Este arquivo é criado pelo programa para armazenar informações sobre perdas de potência e energia.

I-----I								
I								
I ALIMENTADOR 01L1 - SE				RESUMO DAS PERDAS NO ALIMENTADOR				I
I								
I-----I								
I	I	I	I	I	I	I	I	
I CASO	I	I DURACAO	I	I POTENCIA	I	I PERDAS	I ENERGIA	
I	I	I (h)	I	I (KW)	I	I (KW)	I ENTREGUE	
I	I	I	I	I	I	I	I (MWh)	
I-----I								
I	I	I	I	I	I	I	I	
I 1	I	I 3	I	I 3007.5	I	I 530.6	I 9.02	
I	I	I	I	I	I	I	I	
I-----I								

(conclusão)

ENERGIA ENTREGUE	PERDAS DE ENERGIA
9.0 MWh / Dia	1.59 MWh / Dia
270.7 MWh / Mes	47.76 MWh / Mes
Perdas de Energia (%) : 17.64 %	

Os arquivos L1JTB.FLX e L1JTB.UNI são criados pelo programa fluxo para auxiliar na apresentação do diagrama unifilar contendo informações sobre o sistema. O primeiro contém dados sobre os valores dos fluxos de potências ativas e reativas, corrente e tensão nas barras. O segundo contém dados sobre as distâncias entre as barras, tipo de cabo e a direção a ser tomada pelas mesmas.

I.3 - Programa Perfil

Este programa tem a função de desenhar o perfil de tensão ao longo do alimentador. Sua utilização é bastante simples. Basta digitar o nome do programa:

- ⇒ Nome do programa: **Perfil**
- ⇒ Nome do arquivo .TEN: **L1JTB**
- ⇒ Nome de cada arquivo .FLX: **L1JTB**

Obs.: Não necessita de escrever a extensão de ambos os arquivos.

É importante observar que o gráfico será traçado com os dados existentes no arquivo L1JTB.TEN, gerado pelo programa **Fluxo**, para o exemplo apresentado no capítulo 6.

I.4 - Programa Junta

Este é um programa auxiliar que tem a função de agrupar diversos arquivos com valores das tensões em um determinado sistema para traçar várias curvas sobrepostas. Sua utilização é bastante simples, basta digitar :

⇒ Nome do programa: **Junta**

⇒ Número de arquivos que serão agrupados

⇒ Nome de cada arquivo

Assim o programa criará um arquivo com o nome **TENSAO.SAI** contendo os dados de todos os arquivos.

I.5 - Programa Unif

Este é um programa tem a função de desenhar o diagrama unifilar do sistema que se deseja analisar. No capítulo 6 apresenta o diagrama unifilar do alimentador exemplo L1JTB.NEW.

⇒ Nome do programa: **Unif**

⇒ Número do arquivo de dados .DBF: L1JTB

Obs.: Não precisa escrever do arquivo.

II.2 - Resultados dos Fluxos de Potência:

```

-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:30 Pagina 019 I
-----I
I TITULO : 01L2 DIN - DIN CASO 3 I
-----I
I D A D O S G E R A I S D O S I S T E M A I
-----I
I N_barra I N_linha I N_trafo I N_Capacitor I N_Reator I Tipo de barra I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 23 I 22 I 0 I 1 I 0 I PQ 22 I PV 0 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Carga Total do Sistema I Potencia Base I Tensao Base I Z_Base I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 2238.2 KW I 588.1 KVAr I 100.0 MVA I 13.8 KV I 1.9 OHMs I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Tolerancias de Potencia I Tolerancia de Tensao I N_Iteracoes I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I .0000010 DP I .0000010 DQ I .0050000 pu I 99 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Limites de Tensao : Maximo = 2.0 pu Minimo = .2 pu I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Rotacao de Eixos : ATIVADA - Angulo de Rotacao = 40.0 Graus I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I A R Q U I V O S U T I L I Z A D O S D U R A N T E O P R O C E S S A M E N T O I
-----I
I Arquivo de dados : l2din.NEW I
I Arq Geral de Saida : l2din .SAI I
I Arq de saida (RESUMO) : l2din .RES I
I Arq p/ Perfil de Tensao: l2din .TEN I
I Arq c/ Resumo de Perdas: l2din .PER I
-----I
1
-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:30 Pagina 020 I
-----I
I TITULO : 01L2 DIN - DIN CASO 3 I
-----I
I D A D O S D E L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S I
-----I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I DA I PARA I Resist I X_serie I B_shunt I I I I
I BARRA I BARRA I pu I pu I VA I TAP I Cabo I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 1 I 2 I 2.6661 I 1.9109 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I 2 I 3 I 2.0087 I 1.4397 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I 3 I 4 I 1.5633 I .4911 I .0000 I .0000 I I4 CAA I
I 3 I 5 I 1.7202 I 1.2329 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I 5 I 6 I .3470 I .2487 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I 6 I 7 I .1242 I .0890 I .0000 I .0000 I I1/0 CAA I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

(Continuação)

```

I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I   7 I   8 I   .4657 I   .1463 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I   7 I   9 I   .9313 I   .6675 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I   6 I  10 I   1.3623 I   .9764 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  10 I  11 I   1.6435 I   1.1780 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  11 I  12 I   .9861 I   .7068 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  12 I  13 I   .1996 I   .0627 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I  12 I  14 I   2.1786 I   .6844 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I  14 I  15 I   1.2889 I   .4049 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I  12 I  16 I   1.5777 I   1.1308 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  16 I  17 I   .8980 I   .2821 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I  16 I  18 I   .4419 I   .3167 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  18 I  19 I   2.3557 I   1.6884 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  19 I  20 I   1.7202 I   1.2329 I   .0000 I   .0000 I1/0 CAA I
I  20 I  21 I   .7899 I   .2482 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I  20 I  22 I   .5654 I   .1776 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I  22 I  23 I   .6652 I   .2090 I   .0000 I   .0000 I4 CAA I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

```

I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:30 Pagina 021 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

```

I TITULO : 01L2 DIN - DIN CASO 3 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

```

I D A D O S D E B A R R A I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

```

I   I   I TENSÃO I ANG I   I   I S_inst I P_car I Q_car I
I BARRA I NOME I pu I GR I F_pot I F_car I KVA I KW I KVAR I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I   2 I 02 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 250.0 I 47.9 I 12.6 I
I   3 I 03 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 295.0 I 75.4 I 19.8 I
I   4 I CACHOEIR I 1.00 I .0I .00 I .00 I 90.0 I 17.2 I 4.5 I
I   5 I 05 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 295.0 I 81.7 I 21.5 I
I   6 I CAIÇARA I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I   7 I 07 I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I   8 I LOC LOGR I 1.00 I .0I .00 I .00 I 360.0 I 220.5 I 57.9 I
I   9 I LOC. BRA I 1.00 I .0I .00 I .00 I 330.0 I 164.2 I 43.2 I
I  10 I 10 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 130.0 I 29.1 I 7.6 I
I  11 I 11 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 180.0 I 40.8 I 10.7 I
I  12 I 12 I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I  13 I DUAS EST I 1.00 I .0I .00 I .00 I 245.0 I 137.4 I 36.1 I
I  14 I 14 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 367.5 I 168.3 I 44.2 I
I  15 I SERRA RA I 1.00 I .0I .00 I .00 I 270.0 I 114.9 I 30.2 I
I  16 I 16 I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I  17 I LAG DENT I 1.00 I .0I .00 I .00 I 452.5 I 235.1 I 61.8 I
I  18 I 18 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 300.0 I 57.4 I 15.1 I
I  19 I 19 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 210.0 I 40.2 I 10.6 I
I  20 I 20 I 1.00 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I  21 I 21 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 765.0 I 386.5 I 101.6 I
I  22 I JACARAU I 1.00 I .0I .00 I .00 I 390.0 I 238.9 I 62.8 I
I  23 I 23 I 1.00 I .0I .00 I .00 I 360.0 I 182.6 I 48.0 I
I   1 I SE DIN I 1.02 I .0I .00 I .00 I .0 I .0 I .0 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```


(Continuação)

```

I-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:30 Pagina 022 I
I-----I
I TITULO : 01L2 DIN - DIN CASO 3 I
I-----I
I TABELA DOS NUMEROS DOS TRECHOS DO ALIMENTADOR, NUMEROS E NOMES DAS BARRAS I
I-----I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I N_TRECHO I DA BARRA I PARA BARRA I N_TRECHO I DA BARRA I PARA BARRA I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I 1 I 1 SE DIN I 2 02 I 2 I 2 02 I 3 03 I
I 3 I 3 03 I 4 CACHOE I 4 I 3 03 I 5 05 I
I 5 I 5 05 I 6 CAIÇAR I 6 I 6 CAIÇAR I 7 07 I
I 7 I 7 07 I 8 LOC LO I 8 I 7 07 I 9 LOC. B I
I 9 I 6 CAIÇAR I 10 10 I 10 I 10 10 I 11 11 I
I 11 I 11 11 I 12 12 I 12 I 12 12 I 13 DUAS E I
I 13 I 12 12 I 14 14 I 14 I 14 14 I 15 SERRA I
I 15 I 12 12 I 16 16 I 16 I 16 16 I 17 LAG DE I
I 17 I 16 16 I 18 18 I 18 I 18 18 I 19 19 I
I 19 I 19 19 I 20 20 I 20 I 20 20 I 21 21 I
I 21 I 20 20 I 22 JACARA I 22 I 22 JACARA I 23 23 I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

```

I-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:32 Pagina 023 I
I-----I
I TITULO : 01L2 DIN - DIN CASO 3 I
I-----I
I Resultados da Simulacao Estatica de Sistemas de Potencia I
I-----I
I Tempo de Simulacao : 00:00:00.00 I
I Numero de Iteracoes : 6.5 I
I-----I
I Relatorios de Saida I
I-----I
I 1 - Tensoes e Fluxos de Potencia - Solicitado I
I 2 - Tensoes e Perdas nos Trechos - Solicitado I
I 3 - Geracao, Barra e Elementos Shunt - Solicitado I
I 4 - Transformadores - Solicitado I
I-----I

```

```

I-----I
I Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:32 Pagina 024 I
I-----I
I TITULO : 01L2 DIN - DIN CASO 3 I
I-----I
I DADOS DE BARRA I
I-----I
I Barra de Swing - Barra numero: 1 Localizacao : SE DIN I
I-----I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I
I I GERACAO - KVA I CARGA - KVA I ELEMENTOS SHUNT I
I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I-----I

```

(Continuação)

I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I Bus	I Nome	I P-Ger	I Q-Ger	I P-Load	I Q-Load	I	I	I	I
I I	I	I KWatt	I KVar	I KWatt	I KVar	I	I	I	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	2I 02	I .0	I .0I	I 45.5	I 11.3	I	I	I .0	I
I	3I 03	I .0	I .0I	I 68.1	I 16.0	I	I	I .0	I
I	4I CACHOE	I .0	I .0I	I 15.5	I 3.6	I	I	I .0	I
I	5I 05	I .0	I .0I	I 70.8	I 15.7	I	I	I .0	I
I	6I CAIÇAR	I .0	I .0I	I .0	I .0	I	I	I .0	I
I	7I 07	I .0	I .0I	I .0	I .0	I	I	I .0	I
I	8I LOC LO	I .0	I .0I	I 189.1	I 41.4	I	I	I .0	I
I	9I LOC. B	I .0	I .0I	I 140.7	I 30.8	I	I	I .0	I
I	10I 10	I .0	I .0I	I 24.4	I 5.2	I	I	I .0	I
I	11I 11	I .0	I .0I	I 33.2	I 6.7	I	I	I .0	I
I	12I 12	I .0	I .0I	I .0	I .0	I	I	I .0	I
I	13I DUAS E	I .0	I .0I	I 109.9	I 21.7	I	I	I .0	I
I	14I 14	I .0	I .0I	I 133.7	I 26.1	I	I	I .0	I
I	15I SERRA	I .0	I .0I	I 91.1	I 17.7	I	I	I .0	I
I	16I 16	I .0	I .0I	I .0	I .0	I	I	I .0	I
I	17I LAG DE	I .0	I .0I	I 184.1	I 35.0	I	I	I .0	I
I	18I 18	I .0	I .0I	I 44.9	I 8.5	I	I	I .0	I
I	19I 19	I .0	I .0I	I 30.8	I 5.6	I	I	I .0	I
I	20I 20	I .0	I .0I	I .0	I .0	I	I	I .0	I
I	21I 21	I .0	I .0I	I 291.4	I 51.6	I	I	I .0	I
I	22I JACARA	I .0	I .0I	I 180.3	I 32.0	I	I	I 300.0 CAPAC.	I
I	23I 23	I .0	I .0I	I 137.7	I 24.4	I	I	I .0	I
I	1I SE DIN	I 2320.9	I 577.6I	I .0	I .0	I	I	I .0	I

I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I Bus	I Nome	I Tensao	I Angulo	I Bus	I Nome	I P-Fluxo	I Q-Fluxo	I Corr	I
I I	I	I pu	I Gr	I I	I I	I KWatt	I KVAR	I Amp	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
I	2I 02	I .949	I -1.71	I	I	I	I	I	I
I		I	I	I	3I 03	I 2128.8	I 461.2I	I 96.03	I
I		I	I	I	1I SE DIN	I -2174.3	I -472.5I	I 98.10	I
I	3I 03	I .897	I -3.15	I	I	I	I	I	I
I		I	I	I	2I 02	I -2023.0	I -385.4I	I 96.03	I
I		I	I	I	4I CACHOE	I 15.5	I 3.6I	I .74	I
I		I	I	I	5I 05	I 1939.4	I 365.8I	I 92.03	I
I	4I CACHOE	I .897	I -3.15	I	I	I	I	I	I
I		I	I	I	3I 03	I -15.5	I -3.6I	I .74	I
I	5I 05	I .855	I -4.47	I	I	I	I	I	I
I		I	I	I	3I 03	I -1856.1	I -306.1I	I 92.03	I
I		I	I	I	6I CAIÇAR	I 1785.4	I 290.4I	I 88.49	I

(Conclusão)

I	16I 16	I .755 I	I -8.53 I	I	I	I	I	I	I
I				I 12I 12	I	I -908.4 I	I	I -30.9I	I 50.36 I
I				I 17I LAG DE	I	I 184.7 I	I	I 35.2I	I 10.42 I
I				I 18I 18	I	I 723.8 I	I	I -4.3I	I 40.10 I
I	I 17I LAG DE	I .753 I	I -8.55 I	I	I	I	I	I	I
I				I 16I 16	I	I -184.2 I	I	I -35.0I	I 10.42 I
I	I 18I 18	I .751 I	I -8.77 I	I	I	I	I	I	I
I				I 16I 16	I	I -719.7 I	I	I 7.2I	I 40.10 I
I				I 19I 19	I	I 674.8 I	I	I -15.7I	I 37.61 I
I	I 19I 19	I .730 I	I -10.00 I	I	I	I	I	I	I
I				I 18I 18	I	I -655.7 I	I	I 29.4I	I 37.61 I
I				I 20I 20	I	I 624.9 I	I	I -35.0I	I 35.86 I
I	I 20I 20	I .716 I	I -10.91 I	I	I	I	I	I	I
I				I 19I 19	I	I -612.3 I	I	I 44.0I	I 35.86 I
I				I 21I 21	I	I 292.9 I	I	I 52.0I	I 17.38 I
I				I 22I JACARA	I	I 319.5 I	I	I -96.1I	I 19.49 I
I	I 21I 21	I .713 I	I -10.94 I	I	I	I	I	I	I
I				I 20I 20	I	I -291.5 I	I	I -51.6I	I 17.38 I
I	I 22I JACARA	I .714 I	I -11.03 I	I	I	I	I	I	I
I				I 20I 20	I	I -318.2 I	I	I 96.5I	I 19.49 I
I				I 23I 23	I	I 138.0 I	I	I 24.4I	I 8.21 I
I	I 23I 23	I .713 I	I -11.05 I	I	I	I	I	I	I
I				I 22I JACARA	I	I -137.7 I	I	I -24.4I	I 8.21 I
I	I 1I SE DIN	I 1.020 I	I .00 I	I	I	I	I	I	I

I	Fluxo de Potencia LSPFP - V 3.0 - 21/11/1995 10:37:32 Pagina 027									I
I	TITULO : 01L2 DIN - DIN									I
I	CASO 3									I
I	TENSOES NAS BARRAS				I	FLUXOS DE POTENCIA				I
I	Bus	Nome	ITensao	Angulo	Bus	Nome	P-Fluxo	Q-Fluxo	Corr	I
I	I	I	I pu	I Gr	I	I	I KWatt	I KVAr	I Amp	I
I					I 2I 02	I	I 2320.9 I	I 577.6I	I 98.10 I	I
I	Perdas Totais do Alimentador									I
I	Ativas : 529.61 KWatt									I
I	Reativas : 377.25 KVAr									I