



Janaina Cunha e Silva Arteaga

**Aplicação de Método de Elementos Finitos na Análise de
Variações de Campo em Estruturas Coaxiais devido a
Perturbações nas Condições de Contorno**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Ricardo Bergmann

Rio de Janeiro
Novembro de 2007



Janaina Cunha e Silva Arteaga

**Aplicação de Método de Elementos Finitos na Análise de
Variações de Campo em Estruturas Coaxiais devido a
Perturbações nas Condições de Contorno**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. José Ricardo Bergmann
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações/PUC-Rio

Dr. Flávio José Vieira Hasselmann

Centro de Estudos em Telecomunicações/PUC-Rio

Dr. Luiz Costa da Silva

Centro de Estudos em Telecomunicações/PUC-Rio

Dr. Fernando José da Silva Moreira

UFMG

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de novembro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Janaina Cunha e Silva Arteaga

Graduou-se em Engenharia Elétrica, em dezembro de 2004, na Universidade Federal de Minas Gerais. Em março de 2005, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu mestrado na área de eletromagnetismo aplicado.

Ficha Catalográfica

Arteaga, Janaina Cunha e Silva

Aplicação de método de elementos finitos na análise de variações de campo em estruturas coaxiais devido a perturbações nas condições de contorno / Janaina Cunha e Silva Arteaga ; orientador: José Ricardo Bergmann. – 2007.

102 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Método de elementos finitos. 3. Guias coaxiais. 4. Perturbações em dutos. I. Bergmann, José Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha Família.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor José Ricardo Bergmann pelo estímulo, apoio e parceria no decorrer desta dissertação.

Ao CNPq, a FAPERJ, à PUC-Rio e à PipeWay, pelos auxílios concedidos, sem os quais esta dissertação não poderia ter sido realizada.

À minha família, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

A todos os amigos do CETUC que de alguma forma me estimularam ou ajudaram.

Resumo

Arteaga, Janaina Cunha e Silva; Bergmann, José Ricardo (Orientador). **Aplicação de Método de Elementos Finitos na Análise de Variações de Campo em Estruturas Coaxiais devido a Perturbações nas Condições de Contorno**. Rio de Janeiro, 2007. 102p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é aplicado na análise do campo eletromagnético em dutos metálicos, utilizados no transporte de óleo e gás. Instrumentos de inspeção podem utilizar esse método para verificar a existência de anomalias do tipo amassamentos e corrosões nos dutos, contribuindo para evitar vazamentos que podem causar acidentes ecológicos. Atualmente, a técnica de fuga de campo magnético (MFL) é a mais utilizada para precisar a profundidade dos defeitos encontrados nos dutos devido ao processo localizado de corrosão, onde a espessura se reduz progressivamente até o início de um eventual vazamento. Os picos dos sinais de fluxo magnético defletido indicam a perda de massa metálica localizada. A profundidade dos defeitos é correlacionada com a amplitude dos picos. Neste trabalho, o algoritmo baseado em Método de Elementos Finitos é utilizado para avaliar o desempenho do MEF na localização da posição de defeitos na parede do duto, através dos picos que aparecem nos gráficos de campo magnético. Essa análise será feita utilizando-se dois tipos de alimentação na entrada do duto: (I) apenas propagação do modo fundamental TEM e (II) diferença de potencial entre os cilindros externo e interno do duto. Diversos tamanhos de deformação em posições diferentes do duto serão analisados para se determinar para quais tipos de problema o algoritmo é eficiente.

Palavras-chave

Método de Elementos Finitos, Guias Coaxiais, Perturbações em dutos.

Abstract

Arteaga, Janaina Cunha e Silva; Bergmann, José Ricardo (Advisor). **Application of Finite Element Method in the Analysis of Filed Variations in Coaxial Structures due to Perturbation in the Boundary Conditions.** Rio de Janeiro, 2007. 102p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, the Finite Element Method (FEM) is applied in the analysis of electromagnetic field generated by instruments employed for inspection of pipelines for natural gas-transmission. Inspection instruments can use this method to evaluate anomalies as corrosion and kneading in the superficies of the pipelines. This can avoid leaking that can cause ecological accidents. The Magnetic Flux Leakage (MFL) is the oldest and most commonly used in-line inspection method for finding metal-loss regions in gas-transmission pipelines. MFL inspections are typically used to detect, locate, and characterize metal-loss and other anomalies in natural gas-transmission pipelines. The amplitude or magnitude of an MFL signal is strongly related to defect depth.. Alternatively, in this work, an instrument that generates a TEM wave is explored for inspection of pipelines. To evaluate the field distribution inside the pipe, an algorithm based on Finite Element Method is used to detect and locate an anomaly in the pipeline. It is used two kinds of source in the duct's port: (I) just propagation in the FEM basic mode and (II) different potential between the internal and external cylindrical duct. Several sizes of anomalies will be analyzed to identify for which kind of problems the algorithm is useful.

Keywords

Finite Element Methods, Coaxial wave guides, Pipelines.

Sumário

1	Introdução	14
2	Formulação das Equações	17
2.1.	Introdução	17
2.2.	Formulação Eletromagnética	18
2.3.	Equação de Onda	21
2.4.	Excitação do Dispositivo	23
2.5.	Método de Galerking	26
2.6.	Solução da Equação de Onda Homogênea	29
2.6.1.	Transverse Electromagnetic Mode (TEM)	311
2.6.2.	Transverse Magnetic Mode (TM)	33
3	Método de Elementos Finitos (MEF)	38
3.1.	Discretização do Domínio em Elementos	39
3.2.	Funções de Base e de Teste (Peso)	39
3.3.	Equação do Método de Elementos Finitos em 2D	41
3.4.	Polinômio Interpolador	47
3.5.	Mapeamento e Degeneração	50
3.6.	Preenchimento da Matriz	55
3.6.1.	Cálculo dos termos com $i = j$	55
3.6.2.	Cálculo dos termos com $i \neq j$	57
3.7.	Formação da Matriz Global	60
4	Estudo da estrutura cilíndrica	63
4.1.	Introdução	63
4.2.	Validação do Algoritmo	65
4.3.	Estrutura Cilíndrica Com Alimentação Tipo I e Sem Deformações na Superfície	67
4.4.	Estrutura Cilíndrica com Alimentação Tipo I e Com Deformação na Superfície	72

4.4.1. Variação da Freqüência de Excitação do Duto	73
4.4.2. Variação da Posição da Ranhura	76
4.4.3. Variação do Tamanho da Deformação	77
4.4.4. Conclusões	81
4.5. Estrutura Cilíndrica Com Alimentação Tipo II e Sem Deformações na Superfície	82
4.6. Estrutura Cilíndrica Com Alimentação Tipo II e Com Deformação na Superfície	85
4.6.1. Variação da Freqüência de Excitação do Duto	90
4.6.2. Variação da Posição da Ranhura	92
4.6.3. Variação do Tamanho da Deformação	94
4.6.4. Conclusões	97
5 Conclusões	99
6 Referências bibliográficas	101

Lista de Figuras

Figura 1.1.: Dispositivo de inspeção do duto.	16
Figura 2.1.: Geometria do problema proposto. (a) seção de guia de onda coaxial e (b) sistema de coordenadas cilíndricas [11].	18
Figura 2.2.: Alimentação Tipo I – modo TEM incidente na porta de entrada.....	19
Figura 2.3.: Alimentação Tipo II - fonte de corrente magnética sobre a porta de entrada.	20
Figura 2.4.: Regiões da seção reta da estrutura cilíndrica.	21
Figura 2.5.: Propriedades dos meios 1 (ϵ_1, μ_1) no interior do duto e 2 (ϵ_2, μ_2) no dielétrico.	25
Figura 2.6.: Sistema de coordenadas cilíndricas e vetores unitários correspondentes [11].	300
Figura 3.1.: Exemplos de elementos em duas dimensões [4].	39
Figura 3.2.: Funções de subdomínio.	40
Figura 3.3.: Corrente magnética na parede 1 (entrada) do guia coaxial em 2D.	43
Figura 3.4.: Triângulo de Pascal e polinômios associados de $N=0$ até $N=2$ [7].	47
Figura 3.5.: Coordenadas dos nós do elemento de ordem 1.	50
Figura 3.6.: Mapeamento de um elemento de primeira ordem.	50
Figura 3.7.: Função forma para elemento triangular.	52
Figura 3.8.: Sistema de primeira ordem com 4 elementos e 6 nós.	61
Figura 4.1.: Estrutura cilíndrica com diferença de potencial V	65
Figura 4.2.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo I e sem dielétrico.	65
Figura 4.3.: Campo magnético para uma estrutura lisa e sem perdas.	66
Figura 4.4.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo I.	67
Figura 4.5.: Campo Magnético de um duto sem deformações na superfície, alimentação Tipo I e frequência de 1GHz.	69
Figura 4.6.: Fase de um duto sem deformações na superfície, alimentação Tipo I e frequência de 1GHz.	70
Figura 4.7.: Campo Magnético de um duto sem deformações na superfície e alimentação Tipo I para frequência de 2GHz.	71

Figura 4.8.: Fase de um duto sem deformações na superfície e alimentação Tipo I para frequência de 2GHz.	71
Figura 4.9.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo I e deformação na superfície.	72
Figura 4.10.: Reflexão de ondas na estrutura com deformação na superfície.	74
Figura 4.11.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{cm}$ e $z=6\text{cm}$, com dimensão de $1\text{cm}\times 1\text{cm}$	75
Figura 4.12.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=10\text{cm}$ e $z=11\text{cm}$, com dimensão de $1\text{cm}\times 1\text{cm}$	76
Figura 4.13.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{ cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência $0,5\text{GHz}$	78
Figura 4.14.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{ cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência $1,0\text{ GHz}$	79
Figura 4.15.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência $2,0\text{ GHz}$	80
Figura 4.16.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência de $2,0\text{ GHz}$ e dimensão $2,0 \times 1,0\text{ cm}$	81
Figura 4.17.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo II.	83
Figura 4.18.: Campo Magnético de um duto sem deformações na superfície e alimentação Tipo II para frequência de 1 GHz	84
Figura 4.19 - Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo II.	85
Figura 4.20.: Campo Magnético em um duto com alimentação Tipo II e com deformação na superfície para frequência de 1GHz	86
Figura 4.21.: Campo Magnético em um duto com alimentação Tipo II e com deformação na superfície para frequência de 1GHz	87
Figura 4.22.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo da linha constante de $z=0\text{cm}$ para corrugação entre $z=5$ e 6cm e frequência de 1GHz	88

Figura 4.23.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de $z=5\text{cm}$ para corrugação entre $z=5$ e 6cm e frequência de 1GHz .
..... 88

Figura 4.24.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de $z=6\text{cm}$ para corrugação entre $z=5$ e 6cm e frequência de 1GHz .
..... 89

Figura 4.25.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de $z=21\text{cm}$ para corrugação entre $z=5$ e 6cm e frequência de 1GHz .
..... 89

Figura 4.26.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de $z=23\text{cm}$ para corrugação entre $z=5$ e 6cm e frequência de 1GHz .
..... 90

Figura 4.27.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{cm}$ e $z=6\text{cm}$, com profundidade de 1cm .
..... 91

Figura 4.28.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{cm}$ e $z=6\text{cm}$, com dimensão de $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ e frequência de 2GHz .
..... 93

Figura 4.29.: Pico Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=10\text{cm}$ e $z=11\text{cm}$, com dimensão de $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ e frequência de 2GHz .
..... 93

Figura 4.30.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{ cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência $0,5\text{GHz}$.
..... 95

Figura 4.31.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{ cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência 1GHz .
..... 96

Figura 4.32.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre $z=5\text{ cm}$ e $z=6\text{cm}$, para frequência 2GHz .
..... 97

Lista de tabelas

Tabela 4.1.: Amplitudes das ondas incidentes e refletidas.	69
Tabela 4.2.: Valores dos picos para duto com alimentação Tipo I.	82
Tabela 4.3.: Amplitudes das ondas incidentes e refletidas.	84
Tabela 4.4.: Valores dos picos para duto com alimentação Tipo II.	98