



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15224-TDI/1316

PROJETO ÓTIMO DE MODULADORES ELETROÓPTICOS

Ademar Muraro Júnior

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Airam Jônatas Preto, Stephan Stephany e Ângelo Pássaro, aprovada em 8 de fevereiro de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr. Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dra. Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Anselmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Vinicius da Silva Vitor - Serviço de Informação e Documentação (SID) - bolsista

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva e Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15224-TDI/1316

PROJETO ÓTIMO DE MODULADORES ELETROÓPTICOS

Ademar Muraro Júnior

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Airam Jônatas Preto, Stephan Stephany e Ângelo Pássaro, aprovada em 8 de fevereiro de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M931 Muraro Júnior, Ademar.

Projeto Ótimo de Moduladores Eletroópticos/ Ademar Muraro Júnior. – São José dos Campos: INPE, 2008.

137p. ; (INPE-15224-TDI/1316)

1. Otimização multiobjetivo. 2. Método dos elementos finitos. 3. Algoritmos genéticos. 4. Moduladores eletroópticos. I. Título.

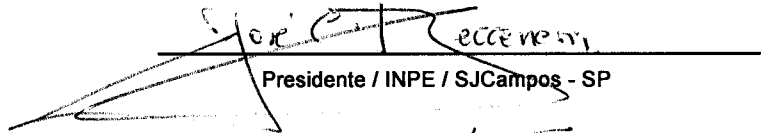
CDU 519.863

Copyright © 2008 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.


Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Computação Aplicada

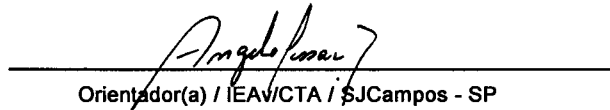
Dr. José Carlos Becceneri


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

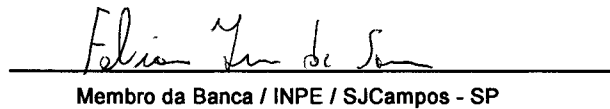
Dr. Stephan Stephany


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Angelo Pássaro


Orientador(a) / IEAV/CTA / SJC Campos - SP

Dr. Fabiano Luis de Sousa


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

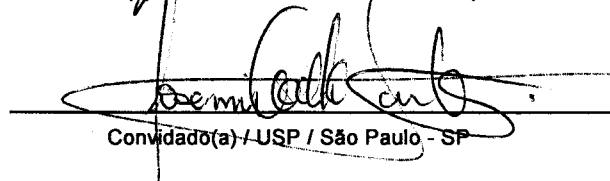
Dr. Fernando Manuel Ramos


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

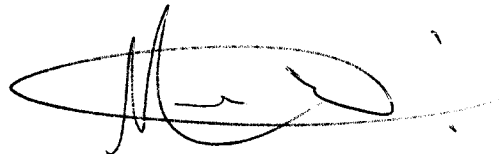
Dr. Wilson Rosa de Almeida


Convidado(a) / IEAV/CTA / São José dos Campos - SP

Dr. Josemir Coelho Santos


Convidado(a) / USP / São Paulo - SP

Aluno (a): Ademar Muraro Júnior



São José dos Campos, 08 de Fevereiro de 2008

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Airam Jônatas Preto e ao Dr. Stephan Stephany, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela orientação acadêmica e apoio.

Ao Dr. Angelo Passaro, do Instituto de Estudos Avançados, pela orientação e amizade. Por sua maestria em direcionar os rumos deste trabalho.

Aos professores do curso de Computação Aplicada, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, que contribuíram para a minha formação profissional.

À Dra. Nancy Mieko Abe, por sua amizade e valiosas sugestões para os meus entraves computacionais.

Aos pesquisadores Onofre Félix de Lima Neto e Roberto Yuji Tanaka pela amizade e produtivas discussões nas várias fases de andamento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disposição em analisar este trabalho.

A outras pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto de Estudos Avançados, por permitir a realização dos meus estudos e fornecer as condições para a realização deste trabalho.

RESUMO

Muitos desenvolvimentos de projetos envolvem a otimização de várias funções objetivo. Estas funções objetivo são frequentemente conflitantes entre si e não podem ser simplesmente agrupadas em uma função a ser otimizada. Este é o tipo de problema conhecido como problema de otimização multiobjetivo, para o qual a solução é um conjunto de pontos conhecido como conjunto Pareto-ótimo. Os problemas multiobjetivo são, frequentemente, difíceis de resolver sem a ajuda de eficientes algoritmos de otimização. Este trabalho apresenta uma abordagem inédita para otimização multiobjetivo, utilizando um algoritmo genético, aplicada na otimização de moduladores eletroópticos. Estes dispositivos têm papel fundamental na modulação externa em sistemas de comunicação por meio de fibras ópticas. Em particular, o dispositivo estudado é o modulador Mach-Zehnder, desenvolvido em substrato de niobato de lítio, com guias de onda fabricados por meio da difusão de titânio. A resolução para o problema direto utiliza o método dos elementos finitos, adequado para o tratamento da complexidade geométrica destes dispositivos e das propriedades não homogêneas e anisotrópicas dos materiais. Para a solução do modelo inverso, duas técnicas multiobjetivo são exploradas, o método da soma ponderada e método das restrições, a fim de otimizar características elétricas do modulador buscando uma geometria ótima. A otimização de pares de características do dispositivo permitiu obter configurações com grande largura de banda e baixa potência de operação. Adicionalmente, mostrou que para alguns pares de características a fronteira de Pareto se apresenta mais complexa, com a existência de regiões não convexas. O processo de otimização implementado mostrou-se eficiente e robusto, de maneira que este mecanismo de análise proposto pode reduzir consideravelmente a construção e avaliação de protótipos físicos, reduzindo o custo e tempo de desenvolvimento.

OPTIMUM DESIGN APPLIED TO ELECTROOPTIC MODULATORS

ABSTRACT

Many design developments involve the optimization of several objective functions. These objective functions are often conflicting with each other and they cannot be simply aggregated into only one function to be optimized. This type of problem is known as the multiobjective optimization problem, for which the solution is a set of points known as Pareto optimal set. The multiobjective problems are often difficult to solve without the aid of efficient optimization algorithms. This work presents a new approach for multiobjective optimization, using a genetic algorithm, applied to the electrooptic modulators optimization. These modulators are key devices for external modulation in fiber optics communication system. The device analyzed in this work is a Mach-Zehnder modulator with optical waveguides of titanium diffused lithium niobate. To solve the direct problem, the finite element method is applied, which is adequate to cope with complex geometries and inhomogeneous and anisotropic materials. To solve the inverse problem, two multiobjective techniques were implemented, the weighted sum method and the ϵ -constraint method, to optimize the electrical characteristics of the modulator in order to achieve an optimal geometry. The optimization of pairs of characteristics of the device allowed obtaining geometrical configurations that present large bandwidth and low drive power. Additionally, it was shown that some pairs of characteristics generate complex Pareto frontiers with nonconvex regions. The optimization process implemented is efficient and robust, and the analysis mechanism proposed allows a considerable reduction of cost and time of development.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 - Otimização aplicada em problemas de moduladores eletroópticos.....	24
1.2 - Motivação, objetivos e contribuições do trabalho.....	26
1.3 - Organização do trabalho.....	27
2 - MODELAGEM DE MODULADORES ELETROÓPTICOS.....	29
2.1 - Modulador eletroóptico.....	29
2.1.1 - Efeito eletroóptico.....	30
2.1.2 - Modelos de moduladores.....	33
2.1.3 - Elementos constituintes de um modulador.....	37
2.1.3.1 - Parâmetros ópticos para a modelagem dos guias de onda.....	38
2.1.3.2 - Características elétricas para a modelagem geométrica de um modulador.....	40
2.2 - Método dos elementos finitos para modelagem de dispositivos ópticos... 42	
2.2.1 - Aplicação do método dos elementos finitos à propagação dos modos transversal elétrico e transversal magnético correspondentes à onda óptica... 45	
2.2.2 - Aplicação do método dos elementos finitos à propagação do modo transversal eletromagnético correspondente à onda eletromagnética..... 48	
3 - PROJETO ÓTIMO E OTIMIZAÇÃO.....	51
3.1 - Conceitos básicos.....	53
3.2 - Problemas inversos e otimização.....	55
3.3 - Classificação dos algoritmos de otimização.....	57
3.4 - Otimização monoobjetivo.....	62
3.5 - Otimização multiobjetivo.....	63

3.5.1 - Método da soma ponderada.....	65
3.5.2 - Método das restrições.....	67
3.5.3 - Outros algoritmos para otimização multiobjetivo.....	68
3.6 - Otimização proposta para o modulador eletroóptico.....	69
3.6.1 - Busca de geometrias ótimas.....	70
3.6.2 - Funções objetivo adotadas.....	72
3.6.2.1 - Impedância característica.....	72
3.6.2.2 - Tensão de meia-onda.....	73
3.6.2.3 - Largura de banda ou índice efetivo da onda elétrica.....	74
3.6.2.4 - Potência de operação.....	74
3.6.2.5 - Função multiobjetivo.....	75
3.7 - Algoritmo genético.....	75
3.7.1 - Algoritmo genético implementado.....	80
4 - RESULTADOS.....	85
4.1 - Processamento paralelo.....	85
4.2 - Avaliação da implementação para o modelo direto.....	87
4.2.1 - Modulador com eletrodos flutuantes.....	87
4.2.2 - Modulador com estrutura “back-slot”.....	88
4.3 - Otimização monoobjetivo.....	93
4.4 - Otimização multiobjetivo.....	99
4.4.1 - Método da soma ponderada (“weighted sum method”).....	99
4.4.2 - Método das restrições (“ ϵ -constraint method”).....	112
4.4.3 - Método da soma ponderada aplicado à otimização de três características.....	115
4.5 - Análise de resultados com descasamento de impedância.....	119
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
5.1 - Contribuições.....	123
5.2 - Trabalhos futuros.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Exemplo esquemático de modulador eletroóptico, com três eletrodos metálicos.....	30
2.2 - Modulador transversal.....	34
2.3 - Exemplo de um modulador de fase, utilizando o efeito eletroóptico.....	35
2.4 - Exemplo de um modulador de amplitude. Um interferômetro MZ e um modulador de fase são implementados usando guias de onda óptica.....	35
2.5 - Corte transversal de um modulador MZ com eletrodos flutuantes.....	36
2.6 - Modulador MZ tipo “ridge”.....	37
2.7 - Modulador MZ com quatro eletrodos.....	37
3.1 - Representação do espaço de busca e o correspondente espaço de soluções, com $S \subset \mathbb{R}^2$ e $Y \subset \mathbb{R}^2$	55
3.2 - Representação de problema inverso e problema direto.....	56
3.3 - Representação de problema inverso e problema direto, para o caso de moduladores eletroópticos.....	57
3.4 - Uma classificação dos métodos de otimização.....	58
3.5 - Exemplos de espaços de busca. (a) convexo e (b) não convexo.....	67
3.6 - Exemplo de um modelo geométrico do modulador eletroóptico, utilizado nas otimizações.....	71
3.7 - Malha de elementos finitos gerada, mostrando um adensamento de elementos na região dos guias ópticos.....	72
3.8 - Parâmetros geométricos do modulador eletroóptico utilizados nas otimizações das características.....	73
3.9 - Algoritmo Genético canônico idealizado por Holland.....	76
3.10 - Fluxograma de um Algoritmo Genético.....	78
3.11 - Uso de um ponto de corte entre dois indivíduos.....	79
3.12 - Algoritmo Genético implementado nesse trabalho.....	81
3.13 - Esquema de codificação adotado para o AG implementado.....	82
4.1 - Estudo da influência de G para Zc e Nm. Comparação de resultados com	

a literatura (FRANCO, 1999b). Distância entre os eletrodos flutuantes $g = 5 \mu\text{m}$	88
4.2 - Modulador LN, corte-X, com estrutura “back-slot” de dois patamares. W : largura do eletrodo central; G distância entre os eletrodos; T_m : espessura dos eletrodos; TLN : espessura ao redor dos guias ópticos; WLN : largura de TLN e T_{sub} : espessura do substrato nas proximidades dos eletrodos laterais.....	89
4.3 - Variação do índice efetivo da onda eletromagnética (N_m) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura “back-slot”.....	91
4.4 - Variação da tensão de meia-onda (V_π) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura “back-slot”.....	91
4.5 - Variação da impedância característica (Z_c) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura “back-slot”.....	92
4.6 - Variação da tensão de meia-onda (V_π) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura “back-slot”. Campo óptico mais próximo do eletrodo central.....	92
4.7 - Corte transversal de um modulador MZ, com três eletrodos. WH : largura do eletrodo central; G : distância entre os eletrodos; T_e : espessura dos eletrodos e T_b : espessura da camada de “buffer”.....	94
4.8 - Variação da função objetivo em função do número de gerações, para Z_c . Curva para o melhor indivíduo de cada geração e elitismo de 4 indivíduos.	95
4.9 - Variação da função objetivo como função do número de gerações, para N_m . Curva para o melhor indivíduo e elitismo de 4 indivíduos.....	98
4.10 - Corte transversal de um modulador MZ, com três eletrodos convencionais e eletrodos flutuantes. WH : largura do eletrodo central; G : distância entre os eletrodos; T_e : espessura dos eletrodos; T_b : espessura da camada de “buffer” e g : distância entre os eletrodos flutuantes.....	100
4.11 - Soluções Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e a tensão de meia-onda V_π , para um modulador MZ convencional.....	102
4.12 - Variação da função objetivo (média e melhor) como função do número de	

gerações, para otimização multiobjetivo, utilizando o método da soma ponderada.....	103
4.13 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ convencional.....	104
4.14 - Espaço de soluções, mostrando uma região não convexa no intervalo $0,05 \leq FZ_c \leq 0,3$	105
4.15 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a potência P_{in} e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ convencional.....	107
4.16 - Soluções Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e a tensão de meia-onda V_π , para um modulador MZ de eletrodos flutuantes.....	108
4.17 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ de eletrodos flutuantes.....	109
4.18 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a potência P_{in} e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ de eletrodos flutuantes.....	110
4.19 - Soluções Pareto-ótimo para Z_c e V_π , para um modulador MZ convencional. Comparação entre o método da soma ponderada e o método das restrições.....	113
4.20 - Soluções Pareto-ótimo e quase-Pareto-ótimo para a Z_c e N_m , no intervalo $0,05 \leq FZ_c \leq 0,3$, para um modulador MZ convencional. Utilizado o método das restrições, com N_m transformado em restrição adicional.	114
4.21 - Soluções Pareto-ótimo e quase-Pareto-ótimo para a Z_c e N_m , no intervalo $0,05 \leq FZ_c \leq 0,3$, para um modulador MZ convencional. Utilizado o método das restrições, com Z_c transformado em restrição adicional..	115
4.22 - Soluções Pareto-ótimo para Z_c , N_m e V_π , para um modulador MZ convencional. Gráfico de curvas de nível, onde FN_m representa a elevação.....	117

4.23 - Curva de superfície das soluções Pareto-ótimo para as características Z_c , N_m e V_π , de um modulador MZ convencional.....	118
--	-----

LISTA DE TABELAS

4.1 - Melhor valor obtido para otimização de Z_c	96
4.2 - Melhor valor obtido para otimização de V_π	97
4.3 - Melhor valor obtido para otimização de N_m	98
4.4 - Parâmetros de um modulador MZ convencional, relativos aos pontos A, B e C das Figuras 4.11, 4.13 e 4.15.....	111
4.5 - Parâmetros de um modulador MZ com eletrodos flutuantes, relativos aos pontos A, B e C das Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.....	111
4.6 - Parâmetros e características de um modulador MZ convencional, relativos aos pontos A, B e C da Figura 4.22.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	algoritmo genético
EDP	equações diferenciais parciais
LN	niobato de lítio (LiNbO_3)
MEF	método dos elementos finitos
MPI	“message passing interface”
MZ	Mach-Zehnder
TE	modo de propagação transversal elétrico
TEM	modo de propagação transversal eletromagnético
Ti:LN	titânio difundido em niobato de lítio
TM	modo de propagação transversal magnético

LISTA DE SÍMBOLOS

$c(\mathbf{x})$	conjunto de restrições para um problema de otimização
\vec{E}	intensidade de campo elétrico
E_{el}	campo elétrico
E_{op}	campo óptico
E^x	modo de propagação x da onda óptica
E^y	modo de propagação y da onda óptica
E_x	componente x do campo elétrico
E_y	componente y do campo elétrico
$F(\mathbf{x}), f(\mathbf{x})$	função objetivo
H_x	componente x do campo magnético
H_y	componente y do campo magnético
$n(E)$	índice de refração (função do campo elétrico)
r	coeficiente eletroóptico
S	espaço de busca ou de parâmetros
$V\pi$	tensão de meia-onda
\mathbf{x}	vetor de parâmetros
Y	espaço de soluções ou objetivo
Z_c	impedância característica do modulador eletroóptico
Z_s, Z_{ref}	impedância característica da fonte de microondas
$\Phi(x, y)$	função escalar
Ψ	uma componente cartesiana de \vec{E} ou \vec{H}
Γ	fator de sobreposição (“overlap”)
Δf	largura de banda
ϵ	constante dielétrica ou permissividade do meio
κ_0	constante de propagação no vácuo

λ_0	comprimento de onda da luz no vácuo
μ	permeabilidade magnética
φ	deslocamento de fase do campo óptico
∇_t^2	operador laplaciano transversal

1 INTRODUÇÃO

Há uma clara tendência na indústria na busca por produtos mais complexos, abrangendo diversas áreas da engenharia. Simultaneamente, há uma pressão para o desenvolvimento acelerado de produtos, com alto padrão de qualidade e preços competitivos. Para atingir esses objetivos, as companhias têm concentrado seus esforços na área de desenvolvimento, a fim de se manterem competitivas. Com isso, foram feitos investimentos no desenvolvimento de ferramentas e técnicas para suportar projetos de produtos complexos. O conceito de projeto é, de maneira genérica, um esforço despendido temporariamente para criar um novo produto, serviço ou processo, com um objetivo definido e claro. Possui início, meio e fim definidos, com duração e recursos limitados e uma seqüência de atividades relacionadas (ANDERSSON, 2000).

O aumento de desempenho computacional de máquinas de baixo custo, tanto em termos de processamento como de armazenamento e recuperação de dados, proliferou o interesse pelas simulações e otimizações numéricas e gerou uma abundância de ferramentas computacionais para engenharia. Em anos mais recentes, as técnicas de otimização avançaram rapidamente e consideráveis progressos foram alcançados. Como consequência, complexos problemas de otimização são possíveis de serem resolvidos atualmente, fato quase impraticável há alguns anos.

Ainda que, em diversas áreas, uma grande parte do desenvolvimento dos projetos envolva a intuição, as técnicas analíticas, simulações de modelos e otimizações numéricas serão de grande valor, permitindo avanços consideráveis nestes setores.

No desenvolvimento dos projetos, dois enfoques principais são levados em consideração: a criação de um projeto novo ou a melhoria de um projeto já existente. Para o primeiro enfoque é fundamental a garantia de um projeto eficiente. Um modelamento adequado dos projetos permite que se tenha o entendimento necessário das propriedades destes, reduzindo custos e tempo até a etapa de construção dos protótipos físicos.

O segundo enfoque é como melhorar os projetos, empregando simulações e técnicas de otimização. Como bem conhecido, os projetos de engenharia são processos iterativos, nos quais novos projetos propostos são gerados e avaliados. Para cada projeto provisório, suas propriedades são previstas ou avaliadas, utilizando conhecimento prévio do problema, soluções analíticas ou simulações computacionais. Estas propriedades são comparadas com os requisitos desejados. Se estes requisitos não são atingidos, o projeto é modificado e reavaliado, a fim de buscar um projeto com o melhor desempenho, também chamado de projeto ótimo, o qual relaciona um modelo matemático que descreve um projeto com métodos de solução que permitem otimizá-lo.

O projeto ótimo pode ser tratado com um problema inverso, o qual é formulado como um problema de otimização (VELHO, 2001), pois na maioria dos casos os métodos numéricos para os problemas inversos são similares aos utilizados nos métodos de otimização de projetos.

1.1 Otimização aplicada em problemas de moduladores eletroópticos

A crescente demanda pelos serviços de telecomunicações e por largura de banda registrada nos últimos vinte anos, está atrelada ao desenvolvimento e otimização dos moduladores eletroópticos, os quais têm um papel fundamental devido às vantagens de uma modulação externa em sistemas de transmissão por meio de fibras ópticas (LIFANTE, 2003; SUHIR, 2000). Nas aplicações de comunicação digital em alta velocidade, a dispersão da fibra foi um fator limitante no desempenho do sistema. Os moduladores externos desenvolvidos com o substrato de niobato de lítio (LiNbO_3), possuem a requerida largura de banda e os meios para minimizar os efeitos da dispersão.

Os avanços tecnológicos dos moduladores de niobato de lítio (também chamados de **moduladores LN**) têm resultado em operação estável em uma ampla gama de temperatura e baixas voltagens de operação. Esses avanços na tecnologia de dispositivos e material foram acompanhados por significativos investimentos em manufatura,

resultando em uma forte demanda por dispositivos de alta qualidade para uso em sistemas de comunicações por fibras ópticas (WOOTEN et al., 2000), e várias outras aplicações comerciais e militares.

Atualmente moduladores com taxas de 2,5 Gb/s e 10 Gb/s são produtos comerciais de prateleira e os moduladores de 40 Gb/s já estão sendo disponibilizados no mercado. A demanda pelo aumento da taxa de transmissão está elevando a frequência de operação destes dispositivos para a faixa de comprimentos de onda da ordem de milímetros.

O interesse neste tipo de dispositivo continua atual, como indicam as contínuas pesquisas visando o aprimoramento de moduladores LN (HOWERTON et al., 2000; CHANG et al., 1999), o qual ainda domina o mercado devido as suas várias vantagens sobre outros tipos de moduladores eletroópticos (LI e YU, 2003). Porém, outros tipos de materiais eletroópticos de alta qualidade, para a confecção de moduladores, têm sido objeto de estudo como é caso do titanato de bário (BaTiO_3) apresentado em Tang et al. (2004) e Petraru et al. (2002), bem como o efeito eletroóptico em materiais orgânicos (polímeros), apresentado em Wang et al. (2007) e Liu et al. (2006) e pesquisas adicionais envolvendo a inclusão de nano-partículas em polímeros, em Sakhno et al. (2007).

Novos processos de fabricação para os moduladores estão continuamente sendo apresentados na literatura. Recentemente, um novo processo de fabricação, usando difusão de Zn para fabricação de guias de onda, foi apresentado em Suárez et al. (2007). Moduladores com configuração tipo “back-slot” foi apresentado em Aoki et al. (2004) e tipo “ridge”, com guias de onda difundidos com Zn, foi analisado em Twu et al. (2007) e usando tecnologia de deposição de filmes finos foi explorada por Nakada et al. (2007), Tang et al. (2005) e Tang et al. (2004). Técnicas para fabricação de dispositivos mais compactos também estão sendo desenvolvidas (SCHMIDT et al., 2007; LIPSON, 2006).

Com relação à área de otimização de moduladores eletroópticos, vários artigos utilizam o Método dos Elementos Finitos, o “Beam Propagation Method” ou o Método das Linhas, por exemplo (ANWAR et al., 2002; HAXHA e RAHAMAN, 2002; FENG et

al., 1999) para analisar ou caracterizar esses dispositivos. O processo de escolha do melhor projeto fica por conta da experiência do pesquisador, que faz uma análise posterior dos resultados. Alguns poucos trabalhos têm relatado o uso de métodos estocásticos na otimização de somente uma característica específica, como por exemplo tensão de meia-onda (NGUYEN et al., 2004).

1.2 Motivação, objetivos e contribuições do trabalho

O projeto ótimo de dispositivos eletromagnéticos é um desafio que se torna cada dia mais complexo para os pesquisadores e projetistas. As técnicas de projeto ótimo, as quais consistem de análise numérica e técnica de otimização, são normalmente utilizadas para melhoria do desempenho de dispositivos eletromagnéticos, envolvendo a determinação de quantidades ou grandezas que podem descrever a forma e o funcionamento do dispositivo, por exemplo.

A motivação para o uso de técnicas de otimização aplicadas na modelagem desses dispositivos é a obtenção de um bom projeto, que represente o compromisso entre os diversos pré-requisitos exigidos, sem o auxílio de protótipos físicos. Em caso de sucesso, substancial economia de custo e tempo será atingida.

Uma vez que os problemas de otimização ocorrem em vários campos como engenharia, física, matemática, entre outras, há um grande potencial de pesquisa nessa área. Isto proporciona um aspecto multidisciplinar a essa área de pesquisa, com a integração de elementos da ciência da computação, física, engenharia e processamento paralelo.

Este trabalho apresenta uma implementação computacional para a realização de um processo de otimização multiobjetivo. A capacidade do processo em obter soluções ótimas foi testada em um classe de dispositivos ópticos, os moduladores eletroópticos, classe esta que apresenta problemas similares aos dos dispositivos eletromagnéticos.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de uma abordagem implícita (iterativa) para o problema inverso, formulado como um problema de otimização de

moduladores eletroópticos, utilizando um Algoritmo Genético para sua resolução e com aplicação de métodos multiobjetivos. A implementação proposta traz um novo enfoque na área de moduladores, permitindo a otimização simultânea de características que normalmente são otimizadas de forma independente, deixando passar despercebidas algumas configurações que podem ser muito promissoras. De fato, o processo de otimização evidenciou configurações de potencial interesse tecnológico.

O enfoque multiobjetivo aplicado à otimização de moduladores eletroópticos, um dos dispositivos mais relevantes na tecnologia de transmissão de informações por meio de ondas ópticas (LIFANTE, 2003), com inúmeras publicações e patentes, pretende oferecer um mecanismo mais abrangente para análise desses dispositivos. Muitas publicações (abordadas na seção 2.4) têm explorado vários graus de otimização para os moduladores eletroópticos, todos visando a melhorar o desempenho desses dispositivos. Mas a análise de uma ou mais características é, na sua grande maioria, realizada pelo uso de “força bruta”, em que apenas um parâmetro do dispositivo é variado de cada vez, calculando-se as características de interesse e obtendo-se um volume de dados, os quais são utilizados na determinação de configurações otimizadas desses dispositivos, por exemplo.

1.3 Organização do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho é descrito aqui, ao longo de cinco capítulos. O Capítulo 1, o qual é composto por esta introdução, descreve a motivação para realização do trabalho, os objetivos e contribuições.

O Capítulo 2 faz uma descrição dos moduladores eletroópticos, os quais foram utilizados como dispositivos a serem otimizados pelo processo de otimização proposto. São apresentados também os parâmetros geométricos de um modulador que foram variados, a fim que se conseguir otimizar uma ou mais características simultâneas deste modulador. É descrita também a formulação, utilizando o método dos elementos finitos, para o cálculo das grandezas relevantes de um modulador eletroóptico, obtendo assim

soluções para o problema direto do processo de otimização.

O Capítulo 3 detalha o mecanismo de otimização que foi adotado neste trabalho. São apresentados conceitos sobre otimização, que servirão para um melhor entendimento e adequação dos termos utilizados. Descreve os conceitos de projeto ótimo, que é um caso de problema inverso, otimização monoobjetivo e as técnicas multiobjetivo adotadas neste trabalho. Apresenta também as funções objetivo utilizadas para o cálculos de aptidão de um modulador eletroóptico e a codificação usada no algoritmo genético, o qual obtém as soluções para o problema inverso.

O Capítulo 4 descreve o processamento paralelo implementado no processo de otimização, apresenta e analisa os dados obtidos nas várias etapas de otimização de um modulador eletroóptico.

Por fim, o Capítulo 5 faz um síntese das contribuições que este trabalho gerou e sugestões para trabalhos futuros.

2 MODELAGEM DE MODULADORES ELETROÓPTICOS

A utilização de um sistema de software para análise de dispositivos eletromagnéticos que permita modelar materiais, principalmente os não homogêneos e anisotrópicos, e configurações geométricas complexas reduz a necessidade de construção e avaliação de protótipos físicos, reduzindo significativamente o custo e o tempo total de desenvolvimento desses dispositivos.

A modelagem computacional permite uma análise comparativa de desempenho entre várias configurações possíveis de um determinado dispositivo. Vários parâmetros podem ser considerados nesse tipo de análise, tais como dimensões físicas, diferentes materiais e diferentes geometrias. A escolha adequada desses parâmetros contribui para o desenvolvimento de um projeto otimizado, com redução drástica na quantidade de protótipos físicos construídos. Essa otimização realizada com ferramentas de simulação computacional é, normalmente, menos dispendiosa do que a construção e avaliação de protótipos físicos.

O desenvolvimento de dispositivos e componentes de óptica integrada apresentam, mesmo em suas formas mais simples, complexidade tal que justificam a aplicação de métodos numéricos e simulações computacionais para seu desenvolvimento.

2.1 Modulador eletroóptico

Os moduladores eletroópticos são um dos mais importantes componentes dos sistemas ópticos de comunicação de banda larga, sendo utilizados, ainda, em sensores de alta precisão, processamento de sinal óptico e computação óptica (ALFENESS, 1982).

A estrutura básica de um modulador eletroóptico consiste de uma pastilha de elemento dielétrico (substrato) na qual são difundidos (ou gerados por outras técnicas) guias de onda ópticos e sobre a qual são depositados eletrodos metálicos e um filme fino intermediário de material dielétrico, denominado camada “buffer”. O campo elétrico gerado pelos eletrodos penetra na região do guia óptico e modifica a permissividade

elétrica do material nessa região. A interação, denominada efeito eletroóptico, afeta as características de propagação da onda óptica e permite a modulação da onda óptica, normalmente realizada utilizando uma fonte externa de sinal de radiofrequência (microondas). O sinal em microonda é transmitido aos eletrodos, de modo que os sinais elétrico e óptico interajam ao longo de uma distância pré-determinada. A eficiência do modulador depende dessa sobreposição de campos elétrico e óptico (“overlap”) e das características de propagação da onda óptica, guiada pelo canal, e do sinal em microonda, guiado pelos eletrodos. Um exemplo desse tipo de dispositivo pode ser visualizado na Figura 2.1.

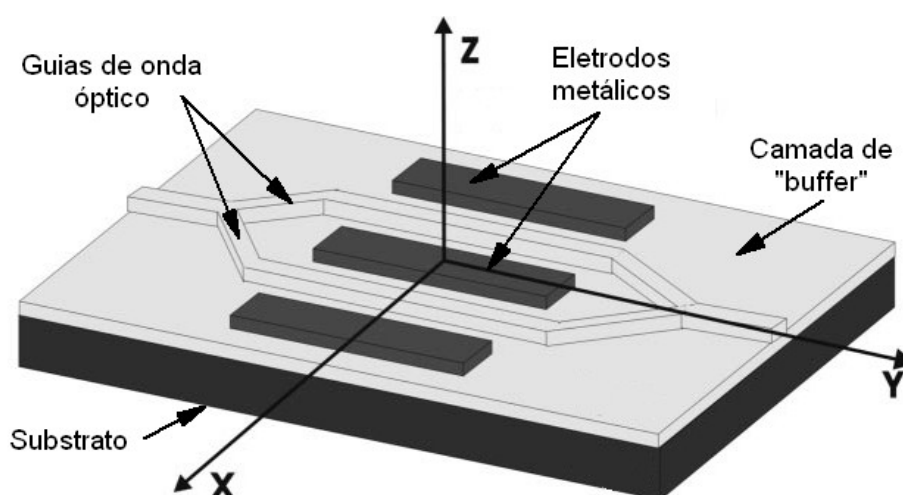


Figura 2.1 - Exemplo esquemático de modulador eletroóptico, com três eletrodos metálicos.

2.1.1 Efeito eletroóptico

Muitos dispositivos de óptica integrada fazem uso do efeito eletroóptico para o seu funcionamento. Os materiais utilizados para a fabricação desses dispositivos têm as suas propriedades ópticas modificadas quando submetidos a um campo elétrico, o qual provoca forças que distorcem as posições, orientações ou estruturas cristalinas das moléculas constituintes do material (SALEH e TEICH, 1991; ALFENESS, 1982). O efeito eletroóptico é a mudança no índice de refração do material, resultante da aplicação de um campo elétrico estático ou de baixa frequência (comparativamente à frequência de resposta do material eletroóptico). Um campo elétrico aplicado a um

material eletroóptico anisotrópico modifica os seus índices de refração, de maneira que isso tem efeito sobre o comportamento da luz polarizada que se propaga por ele.

A dependência do índice de refração, sob a influência de um campo elétrico, ocasiona dois tipos de efeitos:

- (a) O índice de refração varia proporcionalmente ao campo elétrico aplicado, conhecido como efeito eletroóptico linear (ou efeito Pockels),
- (b) O índice de refração varia proporcionalmente ao quadrado do campo elétrico aplicado, caso em que este efeito é denominado de efeito eletroóptico quadrático (ou efeito Kerr).

Em ambos os casos, a mudança no índice de refração é muito pequena. Contudo, considerando a atuação deste efeito sobre uma onda óptica se propagando em uma distância que é muito maior do que o seu comprimento de onda no meio, o resultado pode ser significativo. Por exemplo, se o índice de refração aumenta em 10^{-5} , uma onda óptica se propagando em uma distância de 10^5 comprimentos de onda terá um deslocamento de fase adicional de 2π .

Como apresentado em Saleh e Teich (1991), o índice de refração de um meio eletroóptico é uma função $n(E)$ do campo elétrico aplicado. Essa função varia suavemente com o campo elétrico E , portanto ela pode ser expandida em uma série de Taylor em torno de $E = 0$,

$$n(E) = n + a_1 E + \frac{1}{2} a_2 E^2 + \dots \quad (2.1)$$

sendo: $n = n(0)$, $a_1 = (dn/dE)_{E=0}$ e $a_2 = (d^2 n/dE^2)_{E=0}$

Convencionalmente, a equação 2.1 é escrita em termos de dois coeficientes, chamados coeficientes eletroópticos, $r = -2 a_1/n^3$ e $s = -a_2/n^3$, tal que:

$$n(E) = n - \frac{1}{2} r n^3 E - \frac{1}{2} s n^3 E^2 + \dots \quad (2.2)$$

O termo de segunda ordem e os de ordens superiores dessa série são tipicamente muito menores do que n , de tal forma que os termos superiores aos de terceira ordem podem ser negligenciados. Então, a equação 2.2 é escrita como um aproximação:

$$n(E) \approx n - \frac{1}{2} r n^3 E - \frac{1}{2} s n^3 E^2 \quad (2.3)$$

Os valores dos coeficientes r e s dependem da direção do campo elétrico e da polarização da luz.

Em materiais que possuem um meio óptico conhecido como meio Kerr, o índice de refração depende somente do quadrado do campo elétrico e, como consequência, a equação 2.3 pode ser escrita como:

$$n(E) \approx n - \frac{1}{2} s n^3 E^2 \quad (2.4)$$

Por outro lado, em outros vários materiais o terceiro termo da equação 2.3 é desprezível, se comparado com o segundo, de maneira que se pode escrever o índice de refração como:

$$n(E) \approx n - \frac{1}{2} r n^3 E \quad (2.5)$$

Esses materiais possuem um meio óptico conhecido como meio Pockels. O coeficiente r é chamado de coeficiente Pockels ou coeficiente eletroóptico linear. Os cristais mais comuns que apresentam efeito eletroóptico linear incluem o niobato de lítio (LiNbO_3), tantalato de lítio (LiTaO_3), telureto de cádmio (CdTe), entre outros.

O efeito eletroóptico linear é o mais simples e um dos mais importantes efeitos tratados em óptica. A exploração desse efeito torna possível a construção de chaves, acopladores

e moduladores de fase e amplitude com alta frequência de operação.

Os cristais de niobato de lítio, que possuem natureza anisotrópica, são muito suscetíveis ao efeito eletroóptico, e apresentam outras características desejáveis, tais como: alta transparência, facilidade de processamento, estabilidade química, física e mecânica e compatibilidade com outros materiais de uso em óptica integrada. Por esse motivo, são comumente empregados na fabricação dos dispositivos ópticos.

Processos de fabricação, tais como a troca de prótons (PASSARO et al., 2002), difusão de titânio (FRANCO et al., 1999b) e de outros materiais, produzem alterações adicionais no índice de refração desses substratos, fazendo com que a onda óptica reaja como se estivesse atravessando um material anisotrópico e também não homogêneo, resultando em um caminho preferencial para sua propagação (SALEH e TEICH, 1991). A imposição de um campo elétrico ao material, aplicado na direção perpendicular à direção de propagação da luz e variação com a posição x e y , também contribui para a alteração do índice de refração do material, ponto a ponto.

A utilização dos processos citados, gera caminhos pré-definidos, os quais são preferenciais para a propagação da onda óptica (guias de onda), e o controle adequado do campo elétrico aplicado por eletrodos metálicos, localizados em posições específicas destes caminhos, permite controlar a propagação da onda óptica no dispositivo, durante a sua operação.

2.1.2 Modelos de moduladores

Em Saleh e Teich (1991) é mostrado que um raio de luz atravessando um meio Pockels com comprimento L , no qual há um campo elétrico E aplicado, esse campo impõe um deslocamento de fase φ :

$$\varphi = n(E)k_0 L = \frac{2\pi n(E)L}{\lambda_0} \quad (2.6)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda da luz no vácuo.

Se o campo elétrico é obtido pela aplicação de uma tensão V entre os dois lados do guia de largura d (Figura 2.2), então $E = V/d$ e utilizando-se as Equações 2.5 e 2.6 resulta :

$$V_{\pi} = \frac{d \lambda_0}{L r n^3} \quad (2.7)$$

A característica V_{π} , conhecida como tensão de meia-onda, é a tensão aplicada para a qual há uma mudança na fase da onda de π . A equação 2.7 expressa uma relação linear entre a mudança de fase óptica e a tensão. Dessa forma é possível variar a fase de uma onda óptica por meio da variação da tensão V que é aplicada aos eletrodos, gerando um campo elétrico que atua no guia óptico no qual a onda óptica se propaga.

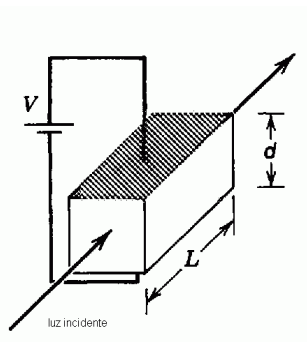


Figura 2.2 - Modulador transversal.

A característica V_{π} , é uma importante figura de mérito do modulador, a qual depende das propriedades do material (n e r), do comprimento de onda da luz λ_0 e da relação d/L .

Uma das representações mais simples de moduladores é o construído com dois eletrodos simétricos, formando um de guia de onda coplanar. Esse tipo de dispositivo é conhecido como modulador de fase (Figura 2.3).

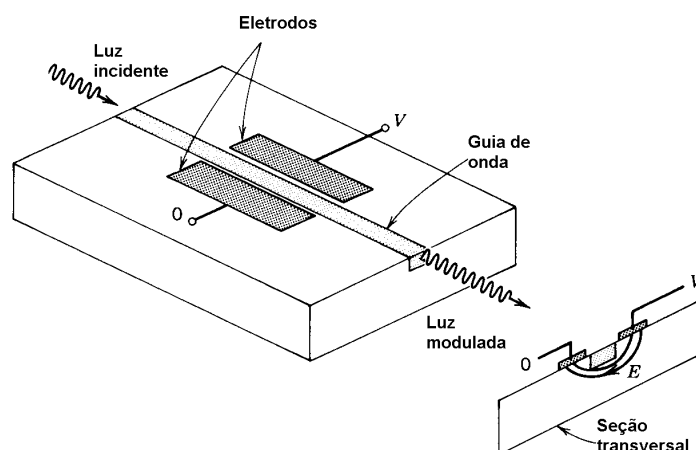


Figura 2.3 - Exemplo de um modulador de fase, utilizando o efeito eletro-óptico.

A mudança de fase não afeta a intensidade de um raio de luz. Porém, se o modulador de fase for colocado em um ramo de um interferômetro, ele pode funcionar como um modulador de amplitude. Um interferômetro do tipo Mach-Zehnder em associação com um modulador de fase dá origem a um modulador de amplitude Mach-Zehnder (ou **modulador MZ**), cujo exemplo é mostrado na Figura 2.4.

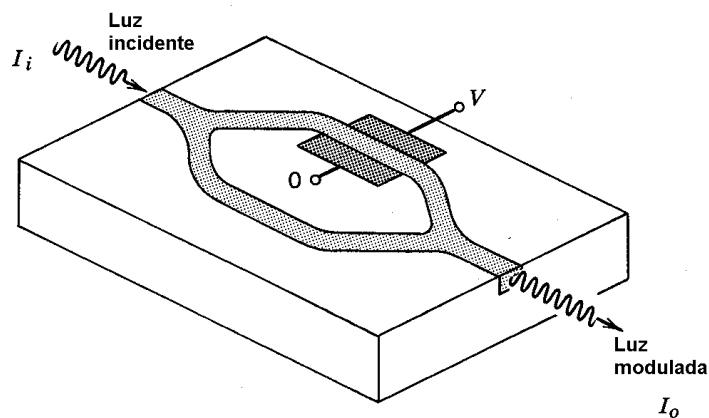


Figura 2.4 - Exemplo de um modulador de amplitude. Um interferômetro MZ e um modulador de fase são implementados usando guias de onda óptica.

Partindo da configuração mais simples de modulador MZ, vários tipos de configurações foram propostas, visando melhorar o desempenho destes dispositivos. Como exemplo, pode-se citar o modulador com três eletrodos metálicos, o modulador com eletrodos

flutuantes, o modulador tipo “ridge”, o modulador com quatro eletrodos metálicos, entre outros.

O modulador com três eletrodos metálicos (CHUNG et al., 1991) baseia-se na aplicação de um campo elétrico nos seus dois ramos ópticos a fim de obter uma modulação mais eficiente, com menor tensão aplicada. (Figura 2.1).

O modulador com eletrodos flutuantes possui, além dos três eletrodos normais, um conjunto de três eletrodos metálicos extras extremamente finos dispostos abaixo dos normais e sem qualquer ligação elétrica com o resto do dispositivo (HOPFER et al., 1998). Mesmo assim, estes eletrodos colaboram na concentração do campo elétrico na região dos guias de onda ópticos (Figura 2.5).

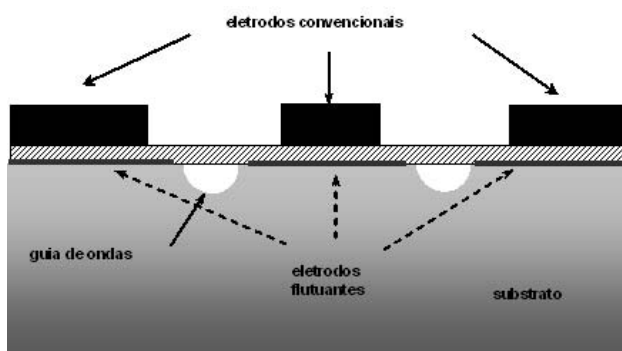


Figura 2.5 - Corte transversal de um modulador MZ com eletrodos flutuantes.

O modulador tipo “ridge” (ABE et al., 1999; CHANG et al., 1999) é construído de forma que ambos os lados dos guias de onda formados são submetidos a um processo de corrosão (“etching”) a fim de se formar uma caixa, encapsulando os guias de onda, minimizando as perdas por propagação (Figura 2.6).

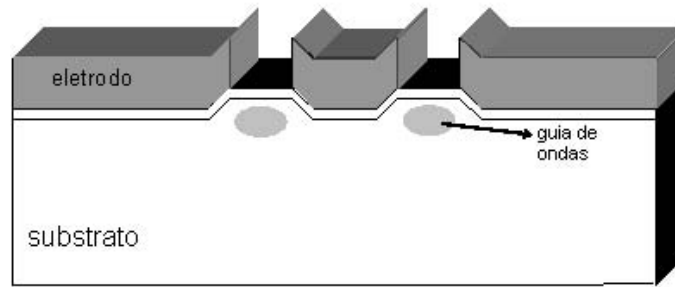


Figura 2.6 - Modulador MZ tipo "ridge".

O modulador com quatro eletrodos metálicos possui o quarto eletrodo na face oposta do substrato onde se encontram os três eletrodos (SAKHORNSAENG et al., 2001). Campos elétricos são aplicados nos eixos x e z a fim de mudar o índice de refração em ambos os eixos no guia de onda formado em um substrato cristalino com corte- z (Figura 2.7).

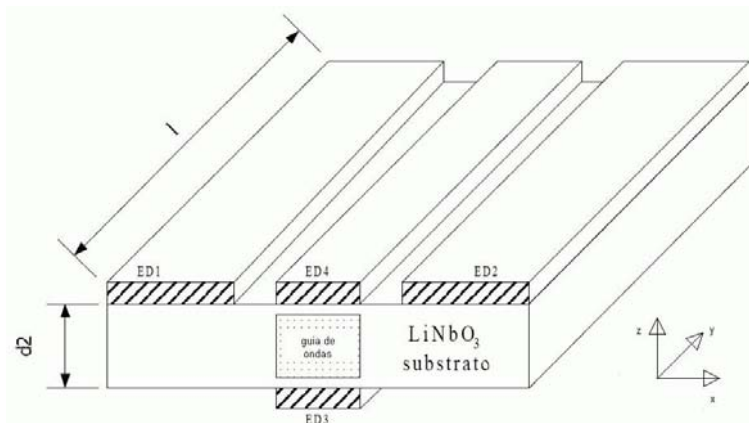


Figura 2.7 - Modulador MZ com quatro eletrodos.

2.1.3 Elementos constituintes de um modulador

No projeto de dispositivos moduladores é essencial a análise de fatores ou características que afetam o desempenho desses (FRANCO et al., 1999b). Por exemplo:

- (a) determinação de parâmetros de fabricação dos guias de onda ópticos em função das características de propagação de ondas e configuração de campos;

- (b) determinação de parâmetros geométricos do dispositivo em função de suas características elétricas, tendo como base os valores nominais de projeto;
- (c) análise do desempenho do modulador em relação à potência necessária para modulação e largura de banda.

Portanto, o desempenho destes dispositivos pode ser estudado em função das suas características elétricas e parâmetros geométricos, bem como em função dos parâmetros de fabricação dos guias de onda.

2.1.3.1 Parâmetros ópticos para a modelagem dos guias de onda

No processo de fabricação de guias de onda formados pela difusão de titânio (Ti) em niobato de lítio (Ti:LN), alguns parâmetros devem ser considerados para se definir o guia de onda: a largura inicial da tira de Ti a ser depositada (W) e sua espessura inicial (H), a temperatura de difusão (T) e o tempo de difusão (t). Essas variáveis devem ser escolhidas para garantir a completa difusão do Ti dentro do substrato de LN, evitando a presença residual de óxido de titânio o qual aumenta as perdas por espalhamento.

Trabalhos publicados sobre o estudo de guias ópticos isotrópicos e difusos podem ser encontrados em Rafizadeh e Ho (1997), Renner (1997), Donnelly e Lau (1996), Ninghua et al.(1995), Rodríguez et al. (1995), entre outros, mas resultados abrangendo os guias ópticos anisotrópicos e difusos não são frequentemente encontrados (FRANCO et al., 1999a; FRANCO et al., 1998b; KATSRIKU et al., 1996).

A construção de guias ópticos é, portanto, uma etapa decisiva para o projeto de dispositivos de óptica integrada. Em particular, no caso de guias fabricados por processos de difusão de Ti ou troca de prótons em cristais LN, os perfis de índices de refração são fortemente dependentes das condições de fabricação, portanto, uma abordagem integrada entre a etapa de fabricação e a análise das características de propagação de ondas deve ser considerada.

Em guias de onda com canais Ti:LN, o índice de refração na camada difusa é (FRANCO et al., 1999b):

$$n_{e,o}^2(x, y, \lambda) = n_{b_{e,o}}^2 + \left[(n_{b_{e,o}} + \Delta n_{s_{e,o}})^2 - n_{b_{e,o}}^2 \right] \exp\left(-\frac{y^2}{d_y^2}\right) f\left(\frac{2x}{W}\right) \quad (2.8)$$

onde:

$$f\left(\frac{2x}{W}\right) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{W}{2d_x}\right] \left(1 + \frac{2x}{W}\right) + \operatorname{erf}\left[\frac{W}{2d_x}\left(1 - \frac{2x}{W}\right)\right] \right\} \quad (2.9)$$

os índices e e o na Equação 2.8 denotam os eixos cristalinos extraordinário e ordinário, respectivamente, x e y são as coordenadas de um ponto no substrato, d_x e d_y são a largura e profundidade de difusão, respectivamente, n_b é o índice de refração do substrato e Δn_s representa a variação de índice superficial com o comprimento de onda, o qual é função do comprimento de onda λ , da espessura inicial da fita de Ti (H) e de outros parâmetros de ajuste:

$$\Delta n_{s_{e,o}}(\lambda) = \left[B_0(\lambda) + B_1(\lambda) \frac{H}{d_{y_{e,o}}} \right] \left(\frac{H}{d_{y_{e,o}}} \right)^{\alpha_{e,o}}, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \alpha_e &= 0,83, \quad \alpha_o = 0,53, \quad 0,6 \leq \lambda (\mu m) \leq 1,6 \\ B_{0e}(\lambda) &= 0,385 - 0,430\lambda + 0,171\lambda^2 \\ B_{1e}(\lambda) &= 9,130 + 3,850\lambda - 2,490\lambda^2 \\ B_{0o}(\lambda) &= 0,0653 - 0,0315\lambda + 0,0071\lambda^2 \\ B_{1o}(\lambda) &= 0,4780 + 0,4640\lambda - 0,3480\lambda^2. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Os coeficientes de difusão D_x e D_y , a largura d_x e a profundidade d_y de difusão e a profundidade de mudança dos índices de refração d_{ye} ou d_{yo} são calculados pela Lei de Arrhenius:

$$D_i = D_{i0} \exp\left(-\frac{E_{i0}}{KT}\right), \quad i = x, y$$

$$d_i = 2\sqrt{D_i t},$$

$$d_{y_{e.o}} = \frac{d_y}{\sqrt{\alpha_{e,o}}}$$
(2.12)

onde D_{i0} é a constante de difusão, E_{i0} é a energia de ativação e K a constante de Boltzmann.

2.1.3.2 Características elétricas para a modelagem geométrica de um modulador

No projeto e construção de um modulador MZ, com guias de onda Ti:LN, várias características elétricas são usadas para a análise desse tipo de dispositivo (CHUNG et al., 1993; CHUNG et al., 1991; FRANCO et al., 1999b). As características que foram utilizadas neste trabalho, são apresentadas nas Equações 2.13 a 2.18, onde C é a capacitância (por unidade de comprimento) do guia de onda, considerando os materiais dielétricos do substrato e do “buffer”; C_0 é a capacitância (por unidade de comprimento) desse guia em vácuo; c é a velocidade da luz no vácuo; G a distância entre os eletrodos; V a tensão elétrica estática entre os eletrodos; E_{op} o campo elétrico da onda óptica; E_{el} o campo elétrico da onda quase-TEM; L o comprimento dos eletrodos; λ_0 o comprimento de onda óptico no vácuo; n_{be} o índice de refração do substrato em λ_0 ; r_{33} o coeficiente eletroóptico do LN e Z_s a impedância da fonte de sinal modulante (microondas). Estas características são:

- (a) impedância característica Z_c - o ajuste da impedância do conjunto elétrico do modulador eletroóptico (Equação 2.13) permite uma melhor inserção do sinal modulante, minimizando as perdas por reflexão,

$$Z_c = \frac{1}{c} \frac{1}{\sqrt{C C_0}}$$
(2.13)

- (b) tensão de meia-onda V_π - é tensão aplicada aos eletrodos, resultando em uma

defasagem de 180° (π rad) entre as ondas ópticas que se propagam nos dois caminhos ópticos do modulador (Equação 2.14),

$$V_\pi L = \frac{\lambda_0 G}{n_{be}^3 r_{33} (|\Gamma_1| + |\Gamma_2|)} \quad (2.14)$$

sendo que o fator integral de “overlap” Γ_i ($i = 1, 2$) representa a sobreposição do campo elétrico modulador ao campo da onda óptica (Equação 2.15), em cada um dos caminhos ópticos do modulador, definido por:

$$\Gamma = \frac{G}{V} \frac{\iint E_{op}^2(x, y) E_{ei}(x, y) dx dy}{\iint E_{op}^2(x, y) dx dy} \quad (2.15)$$

Se os guias de onda ópticos são posicionados no centro da distância entre os eletrodos, o fator de “overlap” assume o mesmo valor em cada ramo, de maneira que $|\Gamma_1| = |\Gamma_2| = |\Gamma|$.

- (c) índice efetivo N_m do modo quase transversal eletromagnético (quase-TEM), correspondente à onda eletromagnética - o índice efetivo da onda elétrica, dado pela Equação 2.16, deve ser ajustado para melhor sincronizar as ondas elétrica e óptica, o que pode ser feito com a redução do índice efetivo da onda elétrica até um valor próximo ao do índice efetivo da onda óptica (N_o),

$$N_m = \sqrt{\epsilon_{eff}} = \sqrt{\frac{C}{C_0}} \quad (2.16)$$

- (d) largura de banda Δf - maiores larguras de banda de modulação (Equação 2.17) são atingidas, quanto mais os índices efetivos (elétrico e óptico) se aproximarem. Para casos onde não são consideradas as perdas no dispositivo, a largura de banda é dada por:

$$\Delta f L = \frac{1,4c}{\pi |N_m - N_o|} \quad (2.17)$$

(e) potência requerida pelo dispositivo para sua operação (“drive power”) P_{in} , definida como a potência mínima que a fonte de microondas deve ser capaz de suprir ao dispositivo (Equação 2.18),

$$P_{in} = \frac{V_{\pi}^2}{8 Z_s \{1 - [(Z_s - Z_c)/(Z_s + Z_c)]^2\}} \quad (2.18)$$

2.2 Método dos elementos finitos para modelagem de dispositivos ópticos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta numérica para determinação de soluções aproximadas de uma vasta gama de problemas de engenharia. O método foi desenvolvido para o estudo de fadigas em estruturas de aeronaves e foi posteriormente estendido para um campo mais amplo da mecânica. O MEF vem recebendo considerável atenção na engenharia e na indústria por causa da diversidade e flexibilidade como ferramenta de análise. Normalmente se faz necessária a obtenção de soluções numéricas aproximadas em problemas complexos na indústria, para os quais soluções exatas são difíceis de obter. Exemplos destas situações complexas podem ser encontradas em resfriamento de motores elétricos, problemas de transformação de fase, etc. Embora seja possível obter as equações que descrevem o fenômeno e as condições de contorno, é difícil de se obter uma forma de solução analítica para tais problemas. Esta complexidade é devida ao fato de possuírem geometrias ou outros atributos irregulares ou arbitrários.

Com relação aos dispositivos ópticos, vários fenômenos que afetam o desempenho destes podem ser representados por meio de equações diferenciais parciais (EDP). As soluções das EDPs podem ser obtidas analiticamente, para algumas situações simples, ou por meio de métodos numéricos. Um dos métodos numéricos mais utilizados em Engenharia é o MEF, pois ele permite analisar estruturas de formato geométrico

complexo, compostas de materiais não homogêneos, não lineares e com perdas (SILVESTER e FERRARI, 1996). O MEF é uma abordagem confiável e versátil para a análise de guias ópticos e dispositivos eletroópticos. Com relação ao estudo de guias ópticos, o MEF pode ser utilizado tanto em guias isotrópicos como também em guias anisotrópicos e não homogêneos (índices de refração com variação contínua e suave). Os materiais isotrópicos apresentam as mesmas propriedades físicas (para o caso óptico o índice de refração é a propriedade de interesse) em todos os seus eixos ópticos. Por outro lado, os materiais anisotrópicos apresentam propriedades físicas que dependem da direção de observação.

O MEF considera que a região da solução é composta por muitas, pequenas e interconectadas sub-regiões, denominadas elementos finitos, e fornece aproximação local (por elemento) para as equações que descrevem o fenômeno. As equações diferenciais parciais complexas são reduzidas a equações lineares ou não lineares. Neste caso, o procedimento de discretização em elementos finitos (dividindo a região em um número de regiões menores) reduz um problema contínuo, que possui um número infinito de incógnitas, para um com número finito de incógnitas em pontos específicos, denominados nós. Desde que o MEF permite a formação de elementos ou sub-regiões de maneira arbitrária, uma representação quase fiel de domínios com contornos complicados é possível.

Na modelagem de dispositivos e componentes de óptica integrada com base nos efeitos eletroópticos, deve-se considerar as características de propagação das ondas elétricas e ópticas, conforme apresentado na seção 2.1.3. O campo elétrico (gerado por fontes externas) altera as propriedades físicas do substrato, que estão relacionadas com o modo de propagação da onda óptica incidente. O desempenho do dispositivo está relacionado com o casamento das velocidades de propagação dessas duas ondas (largura de banda) e com o casamento de impedância entre o dispositivo e a fonte externa, resultando em um dispositivo com menor consumo de energia. Outros efeitos também podem ocasionar mudanças nas propriedades físicas do substrato, como o efeito termoóptico ou acustoóptico, mas as discussões sobre modelagem numérica de dispositivos ópticos

serão centralizadas somente no efeito eletroóptico.

Apesar das equações de Maxwell descreverem completamente os fenômenos eletromagnéticos, sua solução analítica é impraticável em dispositivos com geometrias complexas. Uma alternativa para contornar este problema é a utilização de métodos de cálculo numérico, para obter-se uma solução aproximada.

O MEF é um dentre os vários métodos conhecidos de cálculo numérico para fenômenos eletromagnéticos. Ele pode ser aplicado, em princípio, sem limitações e a sua implementação é relativamente simples. Uma das principais vantagens do MEF é a possibilidade de tratar contornos complexos com a mesma facilidade com que resolve problemas de geometrias simples, que envolvem contornos retangulares, o que não é possível, por exemplo, com o Método das Diferenças Finitas. Outra vantagem do MEF com respeito a outros métodos numéricos é o tratamento natural de meios não homogêneos, exatamente a situação encontrada em moduladores eletroópticos que utilizam guias difusos.

O maior problema do MEF é a geração de uma malha adequada que respeite todas as interfaces entre materiais diferentes e se adapte às fronteiras complexas. Este problema foi bastante minimizado com o desenvolvimento e divulgação de vários métodos e implementações para geração automática de malhas por computador.

Nesse trabalho, adotou-se a análise para um domínio bidimensional. A adoção do domínio bidimensional se justifica, pois, apesar de restritivo, permite a análise, com uma suficiente precisão, na maioria dos casos práticos encontrados na engenharia, e com ônus computacional bem menor que o domínio tridimensional. Isso é decorrente das simetrias ou conformações da geometria de alguns dispositivos eletromagnéticos, permitindo o estudo bidimensional ou, pelo menos, a obtenção de estimativas de funcionamento de partes ou do todo de um objeto (ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 1989).

Devido à sua aplicabilidade, a modelagem de dispositivos eletromagnéticos utilizando o

MEF foi adotado para os cálculos do modelo direto. Para tanto, este trabalho utilizou um conjunto de bibliotecas matemáticas, denominado SDK-LEVSOFT, que vem sendo desenvolvido em linguagem C++ e com orientação a objetos e permite a resolução de sistemas de equações lineares, usando o MEF (ABE et al., 2002; FRANCO et al., 1998a). Para este trabalho, foi necessário realizar implementações nas bibliotecas matemáticas para incluir o tratamento de materiais anisotrópicos. Após etapas de testes, este recurso foi incorporado nas versões mais recentes das bibliotecas.

2.2.1 Aplicação do método dos elementos finitos à propagação dos modos transversal elétrico e transversal magnético correspondentes à onda óptica

Os guias de onda ópticos podem ser caracterizados, do ponto de vista eletromagnético, por não possuírem bordas fechadas para a onda eletromagnética, ou seja, os campos eletromagnéticos podem se estender até o infinito (na direção transversal). O efeito de guiagem nesses guias ocorre pela diferença entre os índices de refração dos materiais envolvidos.

Nos guias metálicos com dielétricos, os modos transversal elétrico (TE) e transversal magnético (TM) puros estão presentes. Nos guias ópticos, modos com outras configurações de campos são formados e uma classificação diferente é utilizada. Para curtos comprimentos de onda e pequenas diferenças de índices de refração (guiagem fraca), o campo elétrico transversal é primariamente paralelo a um dos eixos transversais. Nesse caso, se o campo elétrico é paralelo ao eixo y , os modos são designados E^y e se o campo elétrico é paralelo ao eixo x , os modos são designados E^x .

Os modos E^x podem ser representados pela aproximação de modos quase-TE, nos quais o componente de campo $E_y = 0$ e as soluções para a equação de onda são obtidas para o componente E_x de campo elétrico. A representação dos modos E^y é obtida pela aproximação de modos quase-TM, onde o componente de campo $H_y = 0$ e as soluções para a equação de onda são obtidas para a componente H_x do campo magnético (FRANCO et al., 1999a).

Partindo das equações de Maxwell (FRANCO,1999c) sem fontes de corrente internas e direção de propagação da onda axialmente ao eixo z , podem-se obter as equações de onda para os modos transversais quase-TE e quase-TM. A equação resultante, para um meio isotrópico e homogêneo, é denominada de equação homogênea de Helmholtz:

$$\nabla_t^2 \Psi + (k^2 - \beta^2) \Psi = 0 \quad (2.19)$$

sendo $\Psi = E_x$ para os modos E^x e $\Psi = H_x$ para os modos E^y , $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ (número de onda) e ∇_t^2 é o operador Laplaciano transversal (SILVESTER e FERRARI, 1996).

Para a obtenção da equação de onda para os modos E^x e E^y considera-se uma onda propagando harmonicamente ao longo do eixo z , em um meio dielétrico anisotrópico, não homogêneo, sem perdas, com permeabilidade magnética relativa $\mu_r = \mu_0$ e tensor permissividade relativa definido como (FRANCO et al., 1999b):

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} n_x^2(x, y) & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2(x, y) & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

com n_x e n_y , sendo os índices de refração nas direções transversais x e y , respectivamente, e n_z o índice de refração na direção longitudinal (z).

Das condições acima e impondo aproximação quase-TE ou quase-TM, podem-se construir as equações de onda que descrevem o comportamento dos possíveis modos de propagação nos guias de onda ópticos.

Deste modo, para os modos E^x , é obtida a equação de onda escalar mostrada abaixo (FRANCO et al., 1999a; FRANCO et al., 1999b):

$$n_z^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{n_z^2} \right) \frac{\partial (n_x^2 E_x)}{\partial x} + \frac{\partial^2 (n_x^2 E_x)}{\partial x^2} + n_z^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + k_0^2 n_x^2 n_z^2 E_x = n_z^2 \beta^2 E_x \quad (2.21)$$

onde β é a constante de propagação e $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ o número de onda no vácuo. Esses parâmetros definem o índice de refração efetivo da onda óptica, dado por $N_o = \beta / k_0$.

De maneira similar, para os modos E^y , tem-se a seguinte equação de onda (FRANCO et al., 1999b):

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + n_y^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{n_z^2} \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + n_y^2 k_0^2 H_x = \beta^2 H_x \quad (2.22)$$

Para obter a formulação do MEF, aplica-se o Método dos Resíduos Ponderados em associação com a aproximação de Galerkin independentemente nas equações 2.21 e 2.22, obtendo-se a equação matricial (FRANCO et al., 1999b; SILVESTER e FERRARI, 1996; ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 1989):

$$[F] \{\Psi\}^T - N_o^2 [M] \{\Psi\}^T = \{0\}^T \quad (2.23)$$

sendo $\Psi = E_x$ para os modos E^x e $\Psi = H_x$ para os modos E^y .

As matrizes para cada elemento finito são dadas por:

$$[M] = \int_{\Omega} \mathbf{A} k_0^2 \{N\}^T \{N\} dx dy, \quad (2.24)$$

$$[F] = [F_1] - [F_2]$$

com Ω o domínio em estudo.

O parâmetro \mathbf{A} e as matrizes $[F_1]$ e $[F_2]$ dependem dos modos de propagação.

Para os modos E^x , $\mathbf{A} = n_z^2$ e as matrizes são:

$$[F_1] = \int_{\Omega} \left(k_0^2 n_x^2 n_z^2 \{N\}^T \{N\} - n_x^2 \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \right) dx dy - \int_{\Omega} n_z^2 \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} dx dy \quad (2.25)$$

$$[F_2] = \int_{\Omega} \left(\delta_x \frac{\partial n_x^2}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \{N\} + \delta_z \frac{\partial n_z^2}{\partial y} \{N\}^T \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \right) dx dy + \int_{\Omega} \delta_z \{N\}^T n_z^2 \frac{\partial g_z^2}{\partial x} \left(\delta_x \frac{\partial n_x^2}{\partial x} \{N\} + n_x^2 \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \right) dx dy$$

Para os modos E^y , $\mathbf{A}=1$ e as matrizes são:

$$[F_1] = \int_{\Omega} \left(k_0^2 n_y^2 \{N\}^T \{N\} - \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \right) dx dy - \int_{\Omega} n_y^2 g_z^2 \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} dx dy \quad (2.26)$$

$$[F_2] = \int_{\Omega} \left[\delta_y g_z^2 \frac{\partial n_y^2}{\partial y} + \delta_z n_y^2 \left(\frac{\partial g_z^2}{\partial y} + g_z^4 \frac{\partial n_z^2}{\partial y} \right) \{N\}^T \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \right] dx dy$$

Em ambos os modos de propagação, $g_z = 1/n_z$. Os parâmetros δ_x e δ_z assumem valor 1 para meios onde os índices de refração n_x e n_z não são homogêneos, ou zero para meios homogêneos. A matriz $[F_2]$ é esparsa e não simétrica, por causa da presença de termos com derivadas parciais no índice de refração.

2.2.2 Aplicação do método dos elementos finitos à propagação do modo transversal eletromagnético correspondente à onda eletromagnética

Diversos guias de onda de interesse tecnológico permitem a propagação de modos ópticos onde as condições de contorno podem ser satisfeitas por campos que não possuem todas as suas componentes presentes. Em particular, a solução de interesse

para linhas de transmissão é uma onda que contenha somente componentes transversais (modo transversal eletromagnético – TEM), ou seja, $E_z=H_z=0$, enquanto que em guias de onda fechados soluções com $E_z \neq 0$ ou $H_z \neq 0$ são possíveis.

Como as ondas TEM possuem $E_z=H_z=0$ (propagação da onda na direção z), o campo elétrico pode ser encontrado a partir do gradiente transversal de uma função escalar $\Phi(x, y)$, a qual só depende das coordenadas transversais e é uma solução da Equação de Laplace em duas dimensões:

$$\nabla(\epsilon_r \nabla \Phi) = 0 \quad (2.27)$$

Para os meios anisotrópicos, o tensor permissividade relativa da Equação 2.27 é similar a:

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Esse tipo de tensor define as características do meio dielétrico de uma classe de guias de onda e guias ópticos.

O MEF quando aplicado à equação de Laplace (2.27), resulta em uma equação matricial do seguinte tipo:

$$[S][\Phi]^T = \{b\}^T \quad (2.29)$$

com:

$$[S] = \int_{\Omega} \left(\epsilon_{xx} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} \frac{\partial \{N\}}{\partial x} + \epsilon_{yy} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \right) dx dy \quad (2.30)$$

onde $\{b\}$ é o vetor das ações, $\Phi = \{N\}[\Phi]^T$ e $E = -\nabla \Phi$, $\{ \}$ representando uma

matriz linha, $\{ \}^T$ uma matriz transposta, $\{N\}$ representando o conjunto completo de funções de base do elemento finito usado e Ω o domínio em estudo.

Para cada elemento finito, a Equação 2.30 pode ser calculada por integração numérica, diretamente na implementação computacional do MEF ou pré-calculada por integração analítica, para um elemento finito de referência (FRANCO et al., 1998a).

3 PROJETO ÓTIMO E OTIMIZAÇÃO

Os problemas em engenharia e ciências podem ser formulados de duas maneiras: encontrar o efeito de uma dada causa ou, de outro modo, definir a causa que produz efeito desejado ou medido. A primeira classe de problemas são denominados problemas diretos, enquanto que a segunda classe são os problemas inversos. A esse grupo pertencem todos os problemas que visam a reconstrução da informação por meio de um modelo matemático, utilizando os dados desejados ou medidos. Os problemas inversos para os quais os dados provêm de medidas, são conhecidos como problemas de identificação ou estimação de parâmetros. O outro grupo de problemas inversos são constituídos pelos problemas de síntese, nos quais os dados são assumidos arbitrários, neste caso pode não haver uma solução. A este grupo pertencem os problemas de projeto ótimo, nos quais o propósito é o desenvolvimento de um dispositivo que possa prover um desempenho ótimo em termos de custos e/ou propriedades físicas, entre outros (NEITTAANMÄKI et al., 1996).

Um projeto ótimo pode ser formulado com um problema de otimização, em que o desempenho deve ser otimizado, satisfazendo todas as restrições, se houverem. Desta forma, a otimização trabalha com a maximização ou minimização de determinadas características de um projeto. Otimizar significa buscar uma melhor solução para um determinado problema.

A otimização é um ramo de pesquisa que trabalha com problemas formulados de maneira a maximizar ou minimizar uma certa função em um espaço dimensional finito Euclidiano sobre um sub-conjunto deste espaço, o que é usualmente determinado por desigualdades funcionais. Durante o século passado, a otimização chegou a um nível de amadurecimento que inclui muitos ramos como, otimização linear, otimização global, otimização discreta, entre outras. Cada um destes ramos tem uma boa fundamentação teórica e é respaldado por uma extensa coleção de algoritmos sofisticados e softwares. A otimização é uma poderosa metodologia para a modelagem e para obter soluções de problemas em uma vasta área de aplicações, tais como, em economia, administração,

indústria e engenharia.

A aplicação da otimização em engenharia tem uma longa história. Duas classes de problemas de otimização, problemas linear e não linear, foram amplamente usados em diversas áreas de aplicação, tais como planejamento de produção, projeto e ajustes de dados (WEISE 2007; NEITTAANMÄKI et al., 1996).

A otimização é vista atualmente como uma ferramenta indispensável de trabalho para profissionais que trabalham em diferentes ramos industriais, como, aeroespacial, automotivo, químico e indústrias de produção. Muitos métodos numéricos foram desenvolvidos e utilizados para a melhoria dos projetos, sendo que estes métodos podem ter uma abordagem determinística ou uma abordagem estocástica.

A popularidade dos métodos estocásticos pode ser atribuída ao fato de que esses são métodos de simples implementação e que não requerem o cálculo de derivadas para o modelo matemático desenvolvido. Esses métodos podem ser usados para otimizar funções contínuas ou discretas. As mais importantes condições, que devem ser satisfeitas para que o uso desses métodos seja possível, são (WEISE 2007; ANDERSSON, 2000):

- (a) O problema deve ser parametrizado, de alguma maneira, a fim de descrever cada possível solução. Essa parametrização pode ser inteira, seqüencial ou na forma de números reais, dependendo do problema e do método utilizado.
- (b) Possibilidade de estimar um valor para a função objetivo, baseado nas características utilizadas para descrever a solução.

Esses métodos são mais adequados para a resolução de problemas nos quais o processo de obtenção de uma solução, uma vez definido um conjunto de dados de entrada (parâmetros da função objetivo), a análise do valor de aptidão e a definição de novos parâmetros sejam operações rápidas. Uma vantagem é que diversas soluções podem ser analisadas independentemente, possibilitando a utilização de processamento paralelo de

grão grosso (tempo de execução é maior do que o tempo de comunicação).

Na área de dispositivos eletromagnéticos, cuja classe de problemas é similar à dos dispositivos ópticos, diversas abordagens foram propostas utilizando métodos estocásticos específicos (HO et al., 2005; YANG et al., 2000), métodos híbridos que combinam dois métodos para acelerar a convergência da solução (HO et al., 2006; VASCONCELOS et al., 1996) e métodos multiobjetivo (LEBENSZTAJN e COULOMB, 2004a; LEBENSZTAJN et al., 2004b; YANG et al., 2004; CANOVA et al., 2003; HO et al., 2003). Especificamente na área de moduladores, Nguyen et al., 2004 apresenta uma otimização monoobjetivo, utilizando o recozimento simulado.

Nas seções seguintes são apresentados alguns conceitos e definições usados em problemas de otimização, conceitos sobre problemas inversos, uma classificação sucinta sobre algoritmos de otimização, os métodos multiobjetivo implementados, as funções objetivo para as características de um modulador eletroóptico e os componentes do algoritmo genético usado neste trabalho.

3.1 Conceitos básicos

Nesta seção são apresentados alguns conceitos básicos relacionados com problemas de otimização.

As **variáveis independentes de projeto** ou **parâmetros de projeto** são quantidades com as quais o projetista trabalha diretamente, tais como, geometria, propriedade dos materiais, configuração dos componentes, dentre outras. Os parâmetros de projeto são, portanto, as quantidades que um projetista pode ajustar a fim de modificar um sistema que está sendo projetado.

As **características** ou **atributos de projeto** são variáveis dependentes, às quais o projetista não pode associar valores diretamente. Seus valores podem ser alterados a partir da modificação dos parâmetros de projeto. No escopo deste trabalho, são consideradas características de projeto para os moduladores eletroópticos, a impedância

característica, a tensão de meia-onda, a potência de operação e a largura de banda.

O **espaço de busca** S (também chamado de espaço de decisão ou de parâmetros) é definido como um espaço formado pelas soluções possíveis, ou soluções candidatas, para a resolução de um problema. As soluções candidatas correspondem a valores admissíveis ou permitidos dos parâmetros de projeto. Cada ponto do espaço de busca define um conjunto de parâmetros, denominado aqui de vetor de parâmetros. Para o caso particular deste trabalho, o espaço de busca é constituído pelos parâmetros geométricos do modulador.

O **espaço de soluções** Y (também chamado de espaço objetivo) é a região que contém a imagem do espaço de busca, ou seja, a projeção do conjunto de vetores de parâmetros que compõem o espaço de busca. Essa imagem é formada pelo conjunto de valores das funções objetivo obtidas e representa uma avaliação ou qualidade de cada possível solução. Neste trabalho, o espaço de soluções está relacionado com as características elétricas desejadas do modulador eletroóptico, todas apresentadas na seção 2.1.3.2 deste trabalho.

As **funções objetivo**, em termos gerais, são representações matemáticas que permitem a avaliação ou comparação dos parâmetros do espaço de busca. Elas representam o índice de desempenho de cada conjunto de parâmetros e busca-se a maximização ou minimização (dependendo do problema) de seus valores a fim de atingir uma solução ótima. A função objetivo relaciona os parâmetros de projeto com as características de projeto.

Portanto, os problemas de otimização podem ser representados por um vetor $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ com n parâmetros de otimização e $\mathbf{x} \in S$ e $S \subset \mathbb{R}^n$, sendo S o espaço de busca. O espaço S é mapeado no espaço de soluções $Y \subset \mathbb{R}^k$ por meio de um vetor $F(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))$, composto de k funções objetivo e $F(\mathbf{x}) \in Y$. Os problemas em que $k=1$ são classificados como problemas monoobjetivos e para $k \geq 2$ incluem-se os problemas multiobjetivos. Uma discussão mais detalhada dos problemas

monoobjetivo e multiobjetivo é apresentada nas seções 3.4 e 3.5, respectivamente. A Figura 3.4 mostra uma visualização da nomenclatura apresentada.

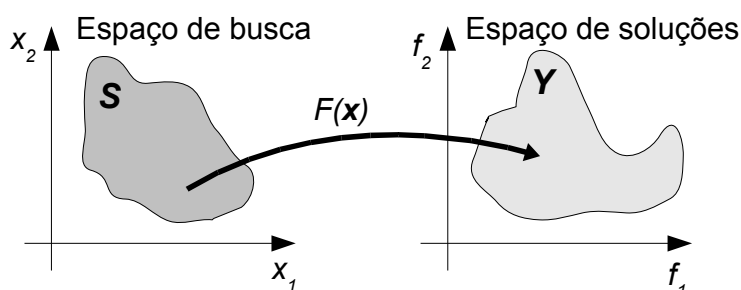


Figura 3.1 - Representação do espaço de busca e o correspondente espaço de soluções, com $S \subset \mathbb{R}^2$ e $Y \subset \mathbb{R}^2$.

Uma **solução ótima local** ou **ótimo local** é a melhor solução encontrada dentro de uma vizinhança de soluções.

Uma **solução ótima global** ou **ótimo global** por outro lado, é melhor solução encontrada dentre todas as soluções possíveis.

3.2 Problemas inversos e otimização

A distinção entre problema inverso e problema direto, para um dado processo ou fenômeno, é a maneira como se interpreta o que é causa e o que é efeito. Conceitualmente, em um problema inverso, procura-se determinar as causas a partir do conhecimento dos efeitos desejados ou observados. Por outro lado, em um problema direto, geralmente existe uma formulação analítica que associa (mapeia) causas conhecidas com seus respectivos efeitos. O problema direto requer informação completa das causas para a determinação dos efeitos. A Figura 3.2 mostra uma representação da relação entre problema inverso e problema direto. Matematicamente, as causas são as condições iniciais, de contorno e propriedades do sistema. Os efeitos são as propriedades calculadas a partir de um modelo direto.

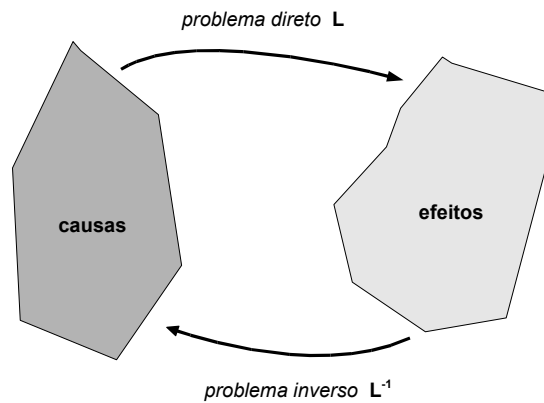


Figura 3.2 - Representação de problema inverso e problema direto.

Os problemas inversos normalmente são de difícil solução, pertencendo à classe de problemas mal-postos, pois raramente cumpre as três definições de um problema bem-posto, definidas pelo matemático Hadamard (VELHO, 2001):

- (a) Existência da solução;
- (b) Unicidade da solução, e
- (c) Estabilidade da solução, sua dependência é contínua e suave com os dados de entrada.

Os métodos para a resolução dos problemas inversos podem ser classificados como explícitos (ou de inversão direta), quando existe uma formulação analítica, ou implícitos (iterativos), nos quais sucessivas soluções candidatas são geradas e analisadas, por meio de um processo iterativo. Na metodologia implícita, o problema inverso é formulado como um problema de otimização, no qual se busca a minimização ou maximização de uma função objetivo. Cada solução candidata do espaço de busca corresponde a um ponto neste espaço e a qualidade desta solução é calculada por meio da função objetivo.

Este trabalho utiliza a abordagem implícita na proposta de uma nova metodologia para o projeto ótimo de moduladores, empregando métodos multiobjetivo. A solução do problema direto é a resolução das características do modulador (citadas na seção 2.1.3.2), por meio do MEF, no qual as informações dos parâmetros geométricos e os

materiais empregados são fornecidos (informação completa e precisa). O problema inverso é solucionado por meio de um algoritmo genético, o qual propõe os parâmetros geométricos e os materiais, na expectativa que uma ou mais características desejáveis do modulador seja(am) atingida(s) com aquele conjunto de parâmetros (Figura 3.3).

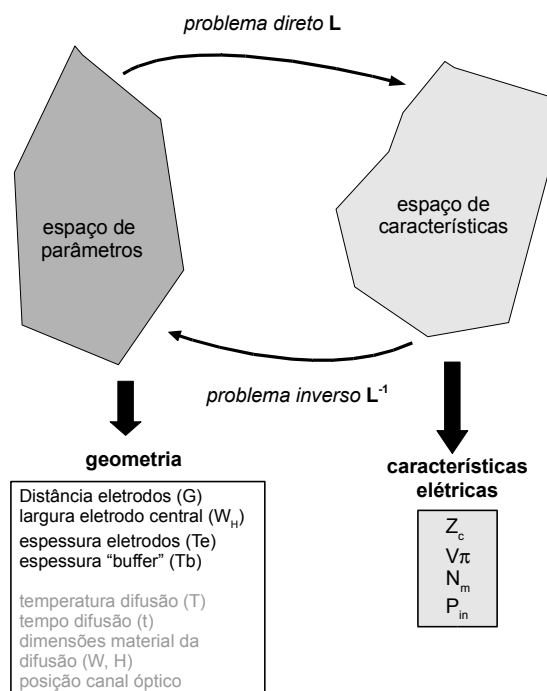


Figura 3.3 - Representação de problema inverso e problema direto, para o caso de moduladores eletroópticos.

3.3 Classificação dos algoritmos de otimização

Existem diversos métodos de otimização e cada um deles alcança o melhor resultado em determinados tipos de problemas. A escolha do método depende de uma série de características do problema a ser otimizado, principalmente do comportamento da função que o representa, a função objetivo, o que pode ser de difícil determinação.

Este trabalho não tem a pretensão de discutir a ampla variedade de métodos de otimização existentes atualmente, mas apresentar, de maneira geral, alguns métodos e mostrar sua classificação de acordo com o método de operação. Geralmente, os métodos de otimização podem ser divididos em duas classes básicas: métodos determinísticos e

estocásticos (ou não determinísticos). Dentre os muitos métodos existentes atualmente, alguns são mostrados na Figura 3.4, de acordo com Weise (2007). Uma forma mais simplificada desta classificação é mencionada em Andersson (2000).

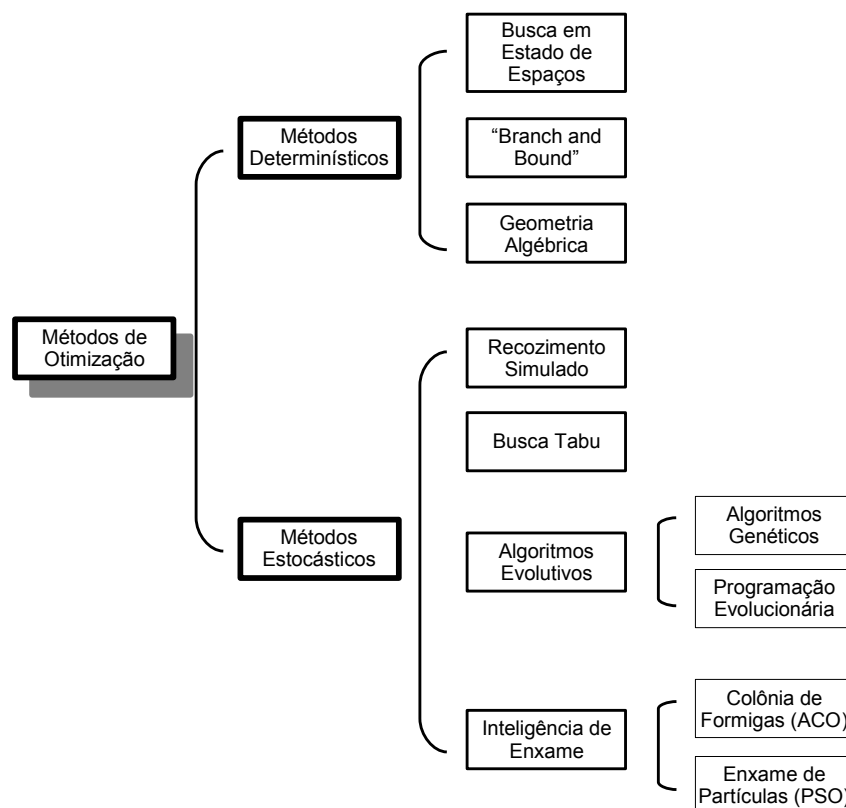


Figura 3.4 - Uma classificação dos métodos de otimização.

Fonte: adaptada de Weise (2007).

Os métodos determinísticos são técnicas baseadas no conceito de buscas consecutivas dentro do espaço de busca, levando-se em conta, normalmente, o cálculo de derivadas ou aproximações destas, requerendo portanto, alguma informação do vetor gradiente, como por exemplo, o ponto no qual ele se anula ou utilizando a direção para qual ele aponta (ANTONIOU e LU, 2007).

Os métodos determinísticos são, geralmente, de execução computacional rápida, porém nem sempre fornecem a melhor solução para um problema (solução ótima global ou ótimo global), mas geralmente acabam por encontrar uma solução intermediária

(solução ótima local ou ótimo local).

Para os casos de problemas de minimização, a procura pelos pontos utiliza um vetor direção de decrescimento da função, cujos passos são geralmente tomados na direção na qual a função é minimizada. A busca pela solução ótima utiliza um vetor de posição corrente (\mathbf{X}_k) para obter a direção na próxima iteração $k+1$ (Equação 3.1).

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \theta_k \mathbf{d}_k \quad (3.1)$$

onde θ_k é a distância do passo e \mathbf{d}_k indica a direção na qual o passo seguinte deverá seguir. O termo θ_k controla a evolução e a precisão da solução. Métodos como o da Seção Áurea ou de Fibonacci (ANTONIOU e LU, 2007), por exemplo, podem ser usados para determinar o valor do passo. A direção do passo \mathbf{d}_k pode ser determinado por inúmeros métodos, como por exemplo, o Método de Newton ou de Fletcher-Reeves (ANTONIOU e LU, 2007).

Estes métodos, por trabalharem com a busca pelo ponto subsequente usando derivadas da função, geralmente produzem bons resultados para funções contínuas, convexas e unimodais (funções que possuem somente um ponto de mínimo ou de máximo).

Por outro lado, os métodos estocásticos, ou seja, aqueles que não utilizam o gradiente, são mais robustos para se localizar o ótimo global em qualquer função e têm sido aplicados em uma vasta gama de problemas de engenharia, pois normalmente são problemas complexos, de difícil representação e descritos por funções nem sempre diferenciáveis. A busca pela solução ótima é resultado de simulações computacionais complexas, dado que as derivadas de uma função objetivo não são conhecidas explicitamente.

O fato de não se conhecer as derivadas da função objetivo resulta em uma desvantagem para os métodos estocásticos pois se torna difícil de se provar que o ótimo global foi atingido. Porém esta dificuldade também está presente nos métodos que utilizam o

gradiente, nos casos em que as derivadas sejam de difícil obtenção. Em ambos os casos, a descoberta de uma solução ótima local poderá ser considerada como um ótimo global, finalizando a busca.

Porém, utilizando os métodos estocásticos em diversas execuções e com diferentes condições iniciais, aumenta-se a probabilidade de que o ótimo local encontrado seja o global, embora isto geralmente requeira mais chamadas da função, o que aumenta o número de análises do problema, ocasionando um custo computacional maior.

Atualmente, com a oferta no mercado de processadores mais rápidos, com vários núcleos (“core”) em uma mesma pastilha, bem como memórias rápidas e de grande capacidade, suprindo os computadores com um alto poder de processamento, esta diferença computacional entre os métodos determinísticos e estocásticos vem diminuindo, tornando esta desvantagem menos relevante. Obviamente, esta comparação tem como base os programas atuais, pois o aumento do poder de processamento em geral leva a implementações mais pesadas a fim de se resolver problemas mais complexos.

Além disso, a maioria dos métodos estocásticos se prestam muito bem para implementação em ambiente de processamento paralelo, ou seja, possuem um paralelismo inerente já que podem realizar buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca.

O funcionamento de alguns dos algoritmos estocásticos mostrados na Figura 3.4 será apresentado a seguir, de maneira sucinta. O Recozimento Simulado e a Busca Tabu são apresentados com mais detalhes em Fouskakis e Draper (2001). Os Algoritmos Genéticos serão apresentados com maior detalhamento na seção 3.7, pois este tipo de algoritmo foi adotado neste trabalho, para a resolução do problema inverso.

O Recozimento Simulado (“Simulated Annealing”) é um dos algoritmos estocásticos mais antigos e um dos primeiros algoritmos que adotou uma estratégia para escapar de

uma solução de mínimo local. As origens do algoritmo estão na mecânica estatística e foi primeiramente apresentado como um algoritmo de busca para problemas de otimização combinatorial em Kirkpatrick et al. (1983). A idéia fundamental é permitir movimentos que resultem em soluções de qualidade pior do que a solução atual (“uphill moves”) a fim de escapar de uma solução de mínimo local. A probabilidade de tal movimento vai decrescendo durante a busca.

As idéias básicas do Método Busca Tabu foram introduzidas em Glover (1986). A Busca Tabu mantém um histórico de busca, o qual é utilizado para definir uma estratégia de exploração. Esse histórico é também utilizado como base para se escapar de um mínimo local. O algoritmo termina quando uma condição de término é alcançada. O término também é alcançado se a lista permitida fica vazia, ou seja, todas as soluções em $N(s)$ ($N(s)$ é a vizinhança de s) são proibidas pela lista tabu (BLUM e ROLI, 2003).

O uso da lista tabu proíbe o retorno a soluções recentemente visitadas, prevenindo um ciclo sem fim e forçando a busca a aceitar até mesmo soluções piores. O tamanho da lista tabu (ou seja, o período de proibição - “tabu tenure”) controla a memória do processo de busca. Com um tamanho pequeno da lista tabu, a busca se concentrará em pequenas áreas do espaço de busca. Em oposição, uma lista com um tamanho grande, força o processo de busca a explorar grandes regiões, por causa da proibição de visitar um grande número de soluções. O tamanho da lista pode variar durante a busca, tornando o algoritmo mais robusto.

A Otimização por Colônia de Formigas (ACO) é um algoritmo proposto por Dorigo et al. (1996). A fonte de inspiração para a ACO foi o comportamento de formigas reais pela procura de alimentos. Esse comportamento possibilita às formigas encontrar os caminhos mais curtos entre as fontes de alimentação e o ninho. Enquanto caminhando das fontes de alimentação para o ninho e vice-versa, as formigas depositam uma substância denominada feromônio no solo. Esta substância é secretada pelas formigas durante os seus percursos, de forma a indicar os caminhos mais promissores a outras formigas. Quando elas decidem sobre uma direção a seguir, elas escolhem, com maior

probabilidade, os caminhos que apresentam concentrações mais fortes de feromônio.

Por ser uma proposta recente, os algoritmos baseados na ACO estão se tornando populares na resolução de problemas ótimo com alto grau de dificuldade. Como consequência, várias propostas de melhoramentos têm surgidas, como apresentado em Ho et al. (2005), que incorpora uma estratégia de elitismo e um nova programação para atribuição dos caminhos.

3.4 Otimização monoobjetivo

Muitos problemas de otimização são geralmente expressos em termos de um único objetivo (otimização monoobjetivo). Isto significa que o processo deve otimizar uma única função (função monoobjetivo) que deve satisfazer uma série de condições de contorno (restrições), as quais são derivadas de restrições observadas nos problemas do mundo real (ANDERSSON, 2000). Um problema de otimização monoobjetivo pode ser definido como mostrado na Equação (3.2), para um problema de minimização:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(\mathbf{x}) \\ & \text{sujeito a } \begin{cases} c_i(\mathbf{x})=0 & i=1,2,\dots,m' \\ c_i(\mathbf{x})\geq 0 & i=m'+1,\dots,m \end{cases} \end{aligned} \quad (3.2)$$

com \mathbf{x} um vetor de n parâmetros de projeto $\mathbf{x}=(x_1,x_2,\dots,x_n)^T$ e $c_i(\mathbf{x})$ o conjunto de restrições para o modelo.

Para o problema acima, é possível obter três conjuntos de soluções:

- (a) Um conjunto de soluções universal, o qual contém todos os valores possíveis de \mathbf{x} , sejam eles factíveis ou não.
- (b) Um conjunto de soluções factíveis, no qual os valores de \mathbf{x} estão em concordância com as restrições $c(\mathbf{x})$.
- (c) um conjunto de soluções ótima, que são aqueles valores factíveis de \mathbf{x} e que,

adicionalmente, levam para um valor ótimo de $f(x)$ (o mínimo valor neste exemplo), seja em um intervalo específico $[a, b]$ ou em um contexto global $(-\infty, \infty)$. Neste caso, o conjunto pode consistir de um único valor ou alguns valores com a característica: $f(x) = f(x')$, com $x \neq x'$.

Portanto, o processo de otimização efetuado em um problema monoobjetivo requer a maximização ou minimização de uma única função, sendo necessário encontrar um máximo ou mínimo, seja ele local ou global, para esta função objetivo. Por outro lado, um problema multiobjetivo trabalha com múltiplas funções objetivo, sendo necessário encontrar valores que maximizem ou minimizem cada uma dessas funções. Uma descrição mais detalhada sobre o conceito de otimização multiobjetivo é apresentado na próxima seção.

3.5 Otimização multiobjetivo

Muitos problemas do mundo real são, geralmente, caracterizados pela presença de diversos objetivos conflitantes. Estes objetivos são representados por meio de funções objetivo e espera-se encontrar um conjunto de valores que maximizem ou minimizem cada uma delas. A busca por soluções para estes problemas é tratada matematicamente como problemas de otimização multiobjetivo e, devido à natureza complexa destes problemas, tornou-se necessário o desenvolvimento de técnicas de otimização específicas para o tratamento desta classe de problemas, conforme descrito em Jones et al. (2002), Lu (2001), Andersson (2000), Coello (2000) e Coello (1999). A exploração de novas técnicas e aprimoramento das já existentes (DOERNER et al., 2004; COELLO e BECERRA, 2003) ainda continua em expansão e há campo para futuras pesquisas em novas áreas, como analisa Jones et al. (2002), que discute as áreas de aplicação das otimizações multiobjetivo com base em uma revisão da literatura.

Um conceito muito utilizado, quando se trabalha com problemas multiobjetivo, é a otimização de Pareto (“Pareto optimality”). A otimização de Pareto foi introduzida no começo do século XX, pelo economista suíço Vilfredo Pareto. Uma solução é dita

Pareto-ótimo se não existe outra solução que é melhor para todos os atributos. Isso significa que, dada uma solução Pareto-ótimo, a busca de um melhor valor para um dos objetivos implica na deterioração de pelo menos um dos demais objetivos. Então, o resultado principal de uma otimização Pareto não é um ponto ótimo, mas um conjunto de soluções Pareto-ótimo, definindo uma fronteira de soluções, com o melhor balanceamento entre os objetivos conflitantes (DEB, 2001 e COELLO, 1999). A partir desta fronteira, uma tomada de decisão posterior, humana ou realizada por outro algoritmo, pode escolher uma configuração mais adequada para o problema em questão.

Muitos aspectos são levados em consideração quando se formula um problema de otimização para um projeto. Primeiramente, deve-se considerar quais propriedades o sistema deve ter, isto é, quais valores se deseja criar e como podem ser medidos. Em segundo lugar, quais as variáveis de projeto, ou parâmetros do sistema, que devem ser manipulados a fim de alcançar o melhor projeto possível. Finalmente, o que realmente é o melhor projeto. Estas questões estão sempre confrontando o projetista. Na formulação do problema de otimização, todas essas questões devem ser formuladas matematicamente, na medida do possível.

Para este trabalho, o objetivo principal foi a implementação de um processo de otimização multiobjetivo ou otimização de Pareto, o que significa o estudo de um processo de otimização pura, sem envolver qualquer mecanismo de decisão posterior.

Um problema geral de otimização multiobjetivo inclui um conjunto de n parâmetros de projeto, um conjunto de k funções objetivo e um conjunto de m restrições. As funções objetivo e as restrições são funções dos parâmetros de projeto. Para um problema de minimização, a otimização multiobjetivo pode ser formulada como (Equação 3.3):

$$\begin{aligned} \text{Min } F(\mathbf{x}) &= (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \\ \text{sujeito a } &\begin{cases} c_i(\mathbf{x}) = 0 & i = 1, 2, \dots, m' \\ c_i(\mathbf{x}) \geq 0 & i = m' + 1, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (3.3)$$

com \mathbf{x} um vetor de n parâmetros de projeto $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ e $c_i(\mathbf{x})$ o conjunto de

restrições para o modelo.

A notação de Pareto é fortemente baseada na definição de dominação, a qual é utilizada para a construção da fronteira de Pareto. Uma solução \mathbf{x}^1 domina outra solução \mathbf{x}^2 qualquer se ela é melhor em pelo menos uma das funções objetivo e não é pior com respeito a todas as outras funções objetivo. Tais soluções dominantes são chamadas Pareto-ótimo e o conjunto destas soluções determinam o conjunto Pareto-ótimo. Em outras palavras, se uma solução $\mathbf{x}^* \in S$ é Pareto-ótimo para algum $\mathbf{x} \in S (\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*)$, então para um problema de minimização:

$$\begin{aligned} f_j(\mathbf{x}^*) \leq f_j(\mathbf{x}) \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, k\} \wedge \\ \exists j \in \{1, 2, \dots, k\} \mid f_j(\mathbf{x}^*) < f_j(\mathbf{x}) \quad . \end{aligned} \quad (3.4)$$

A definição da Equação 3.4, adotada neste trabalho, é apresentada por Deb (2001) e Andersson (2000).

3.5.1 Método da soma ponderada

O método da soma ponderada reúne todo o conjunto de funções objetivo de um problema em uma só função objetivo, para isso multiplicando previamente cada função por um peso definido. Este método é simples de implementar e provavelmente um dos mais utilizados para otimização. Trabalhando com problemas multiobjetivos, este método é o mais conveniente ou intuitivo para se usar como primeiro propósito (HAUPT e HAUPT, 2004; DEB, 2001; POULOS et al., 2001). Por exemplo, considerando-se a busca pela redução do custo de fabricação de um produto e da quantidade de material utilizada, pode-se formular o problema em termos da minimização de uma função que contemple, de alguma maneira, estes dois objetivos com seus respectivos graus de importância (pesos).

O peso dos objetivos são escolhidos, em geral, proporcionalmente à importância de cada objetivo no contexto do problema. Embora exista diferentes métodos para quantificar os

pesos das funções objetivo, geralmente este método requer um valor preciso para cada função objetivo.

Além disso, um vetor de pesos apropriado também depende do escalonamento de cada função objetivo, pois as funções possuem diferentes ordens de magnitude. Este processo é denominado de normalização das funções.

Após a normalização das funções objetivo, é gerada uma função objetivo composta $F(\mathbf{x})$, formada pela soma das funções ponderadas pelos seus respectivos pesos, conforme mostrado na Equação (3.5), exemplificando um problema de minimização.

$$\begin{aligned} \text{Min } F(\mathbf{x}) &= \sum_{j=1}^k w_j f_j(\mathbf{x}) \\ \text{sujeito a } &\begin{cases} c_i(\mathbf{x}) = 0 & i=1, 2, \dots, m' \\ c_i(\mathbf{x}) \geq 0 & i=m'+1, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde \mathbf{x} é um vetor de n parâmetros de projeto $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, $c_i(\mathbf{x})$ o conjunto de restrições e $w_i \in |0,1|$ é o peso das k funções objetivo, com:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1 . \quad (3.6)$$

Observa-se que a função $F(\mathbf{x})$ obtida pela soma dos pesos é uma combinação linear das funções $f_j(\mathbf{x})$. O modo de trabalho do Método da Soma Ponderada é encontrar os pontos ótimos da fronteira de Pareto, os quais são as soluções ótimas da otimização multiobjetivo, por meio de combinações obtidas do vetor peso $\mathbf{W}=(w_1, w_2, \dots, w_k)$.

A título de exemplo, para o caso de duas funções objetivo, uma função multiobjetivo é dada por:

$$F(\mathbf{x}) = w_1 f_1(\mathbf{x}) + w_2 f_2(\mathbf{x}) \quad (3.7)$$

É possível atribuir valores para w_1 e w_2 de tal modo a encontrar duas linhas que

tangencialmente tocam o conjunto de soluções do espaço \mathbf{Y} . A Figura 3.5 mostra o processo de otimização, com a minimização de duas funções F_1 e F_2 , por meio dos pesos (w_1 e w_2). Pelo método da soma ponderada, será encontrado um ponto de cruzamento P de duas linhas L_1 e L_2 (combinações lineares de F_1 e F_2). Este ponto deverá ser uma solução ótima encontrado por meio deste método e pertencente à fronteira de Pareto, no contexto multiobjetivo. A mudança de valores de (w_1 e w_2) permite obter outros pontos P , pertencentes à fronteira de Pareto.

Se o espaço de soluções \mathbf{Y} é convexo, qualquer elemento da fronteira de Pareto pode ser encontrado, pela mudança de valores do vetor peso \mathbf{W} (pesos w_1 e w_2 no exemplo da Figura 3.5a). Porém, se o espaço de soluções possui regiões não convexas (Figura 3.5b), haverá pontos em \mathbf{Y} que não poderão ser representados por uma combinação linear, deste modo estes pontos não serão encontrados por meio deste método. Observa-se que o cruzamento das linhas L_1 e L_2 gera um ponto fora do espaço de soluções (P^*).

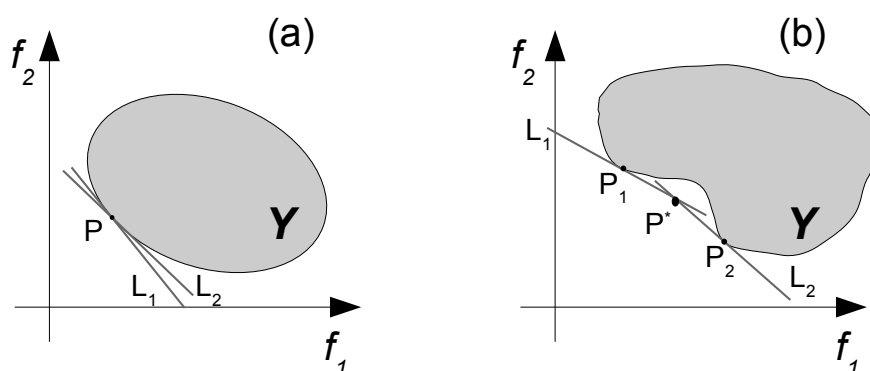


Figura 3.5 - Exemplos de espaços de busca. (a) convexo e (b) não convexo.

3.5.2 Método das restrições

Método das Restrições (“ ϵ -constraint Method”) permite contornar as dificuldades do Método da Soma Ponderada, em problemas que apresentam regiões não convexas no espaço de soluções. Este método baseia-se na minimização (para o caso de problemas de minimização) de uma das funções objetivo (normalmente a primária ou a mais relevante para o problema) e consideram-se as outras funções objetivo como restrições,

as quais são limitadas por valores atribuídos por meio de uma variável ϵ_u . Neste caso, é efetuada a minimização de uma função monoobjetivo, $f_r(\mathbf{x})$ sujeita a restrições adicionais impostas pelas outras funções (HAUPT e HAUPT, 2004; DEB, 2001).

As variáveis ϵ_u são então alteradas de modo a permitir que todo o conjunto Pareto-ótimo seja gerado. Basicamente, para um problema de minimização, este método pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_r(\mathbf{x}) \\ & \text{sujeito a } \begin{cases} c_i(\mathbf{x})=0 & i=1,2,\dots,m' \\ c_i(\mathbf{x})\geq 0 & i=m'+1,\dots,m \\ f_u(\mathbf{x})\leq\epsilon_u & u=1,\dots,k \text{ e } u\neq r \end{cases} \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde os valores de ϵ_u representam limites superiores para as funções $f_u(\mathbf{x})$, os quais não deveriam ser excedidos, \mathbf{x} é um vetor de n variáveis de decisão $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ e $c_i(\mathbf{x})$ o conjunto de restrições.

O problema resultante para este tipo de restrição é uma divisão do espaço de busca original em duas regiões. A região em que $f_u(\mathbf{x})\leq\epsilon_u$ torna-se uma região viável para o problema apresentado na Equação (3.8). Portanto, trata-se agora de encontrar uma solução que minimize $f_r(\mathbf{x})$ nesta região viável.

O fato deste método trabalhar em intervalos de ϵ_u permite o seu uso em problemas arbitrários do espaço de soluções, quer este possua ou não regiões convexas. Porém, uma solução satisfatória depende intimamente da escolha dos valores de ϵ_u . Eles devem, obrigatoriamente, estar entre os valores mínimo ou máximo de cada função objetivo.

3.5.3 Outros algoritmos para otimização multiobjetivo

Os métodos apresentados nas seções 3.5.1 e 3.5.2 têm como abordagem a agregação de funções, porém abordagens diferentes foram aplicadas para outros métodos de

otimização. O MOGA (“multiobjective genetic algorithm”) proposto por Fonseca e Fleming (COELLO, 1999) possui um esquema de ordenamento baseado no número de indivíduos da população corrente que um determinado indivíduo domina. À todos os indivíduos não dominados são atribuídos a ordem 1, enquanto os dominados serão penalizados de acordo com seu grau de dominação em relação aos outros. O NSGA (“non-dominated sorting genetic algorithm”) proposto por Srinivas e Deb (DEB, 2001; COELLO, 1999) também é baseado na classificação dos indivíduos por meio de camadas. O NPGA (“niched pareto genetic algorithm”) de Horn e Nafpliotis (WEISE 2007; DEB, 2001; COELLO, 1999) propõe um esquema de seleção pelo método de torneio, baseado na dominação dos indivíduos. A comparação não se limita a dois indivíduos, mas um número de outros indivíduos da população é utilizado para ajudar na determinação da dominação. Estes métodos não foram implementados neste trabalho, mas servirão de base para trabalhos futuros.

3.6 Otimização proposta para o modulador eletroóptico

A otimização dos moduladores eletroópticos discutidos na seção 2.4 requer o balanceamento de várias características, por meio de alterações nos parâmetros de projeto. De maneira geral, os objetivos principais desejáveis para estes dispositivos são: o casamento de impedâncias entre o dispositivo (impedância característica) e a fonte de sinal modulante (normalmente 50Ω); a minimização da tensão de meia-onda V_{π} ; a maximização da largura de banda Δf e a minimização da potência requerida pelo dispositivo P_{in} .

Vários são os parâmetros que têm impacto na determinação das características de um modulador eletroóptico, dentre eles, o tempo e temperatura de difusão de íons, dimensões da fonte de material a ser difundido, tamanho e formato de eletrodos e distância entre eles, geometria de projeto e uso de diferentes materiais. De acordo com a revisão bibliográfica realizada até o encerramento deste trabalho, esta é a primeira incursão da aplicação de otimização multiobjetivo para este tipo de dispositivo. Por esse motivo, optou-se por fixar os parâmetros construtivos dos guias de onda ópticos,

definindo-se um canal cujo índice efetivo óptico foi obtido aplicando-se a formulação apresentada na seção 2.2.1, reduzindo, desta forma, a análise ao efeito dos parâmetros geométricos do conjunto de eletrodos do dispositivo (ondas eletromagnéticas), apresentada na seção 2.2.2.

Assim, a otimização das características relevantes é possível por meio da análise dos parâmetros geométricos dos eletrodos, tais como, a distância entre os eletrodos, a largura e a espessura dos eletrodos, a introdução de eletrodos extras e a espessura da camada de “buffer”.

Cada um dos objetivos pode ser analisado separadamente, como no caso de otimização simples, gerando um conjunto de funções objetivo que podem, posteriormente, ser combinadas, gerando a função objetivo que buscará as soluções Pareto-ótimo. As seções seguintes apresentam uma discussão sobre as características do modulador e as suas funções objetivo.

3.6.1 Busca de geometrias ótimas

Na Figura 3.6 é apresentado um exemplo do modelo geométrico do modulador eletroóptico, construído para as simulações dos processos de otimização. O problema a ser tratado é bidimensional. e apresenta simetria em torno do eixo vertical que passa pelo centro do eletrodo central. Variando-se esta geometria, particularmente a largura e espessura dos eletrodos, tenta-se obter configurações ótimas, de maneira a otimizar uma ou mais características do modulador. Da maneira como o modelo foi construído, pode-se dizer que este é um problema fechado, no qual todas as possíveis soluções (pontos do espaço de soluções) propostas pelo AG são factíveis. Dado que o número de regiões retangulares são fixas e finitas, isto resulta em um problema de otimização discreto.

As regiões retangulares presentes na região dos eletrodos próxima aos guias ópticos são ora preenchidos com material condutor, ora com ar. O algoritmo para o preenchimento

dessas regiões (atribuição de propriedades físicas) permite a variação da largura dos eletrodos e, conseqüentemente, da distância entre os eletrodos, garantindo que o guia óptico esteja posicionado sempre no centro dos eletrodos. Com relação à distância entre os eletrodos, as regiões são manipuladas aos pares, ou seja, a inclusão ou remoção de uma região no eletrodo lateral deve corresponder a inclusão ou remoção de uma região no eletrodo central, a fim de manter o guia óptico sempre equidistante dos eletrodos. Com relação à espessura dos eletrodos, a espessura do eletrodo central possui uma variação independente em relação aos eletrodos laterais.

Na geração de cada indivíduo atribui-se, desta maneira, material e condições de contorno compatíveis, de uma forma automática, para cada região retangular, horizontal ou vertical. A consistência da geometria dos eletrodos é verificada, de maneira que se uma região tem atribuída propriedades de eletrodo, todas as regiões inferiores a ela também são transformadas em eletrodos, ou seja, não pode haver uma região com propriedades de eletrodo sozinha, sem que esta esteja conectada à outras.

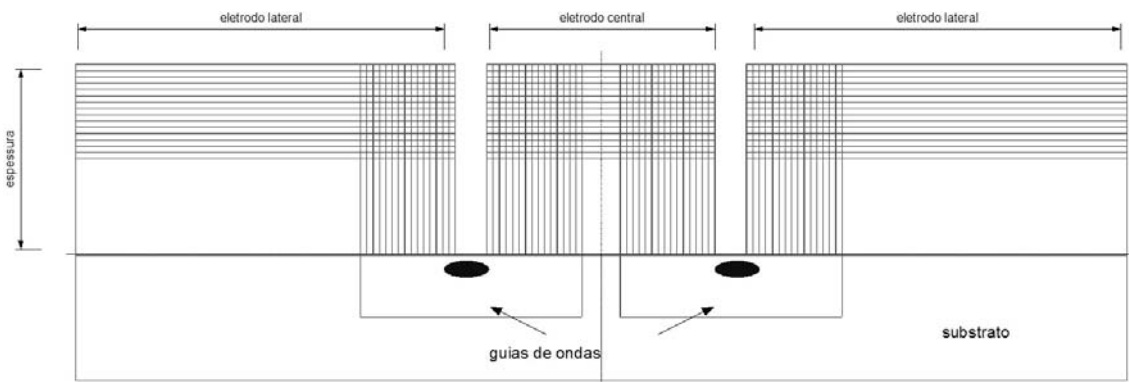


Figura 3.6 - Exemplo de um modelo geométrico do modulador eletroóptico, utilizado nas otimizações.

Na Figura 3.7 é mostrada a malha de elementos finitos gerada, onde se observa o adensamento de elementos na região dos guias ópticos, de forma a obter uma melhor precisão de cálculo dos campos óptico e elétrico nesta região.

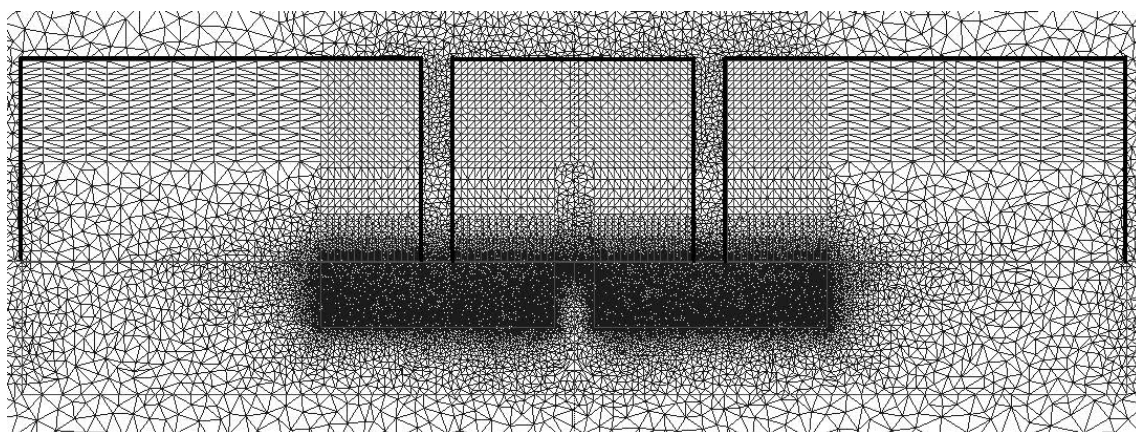


Figura 3.7 - Malha de elementos finitos gerada, mostrando um adensamento de elementos na região dos guias ópticos.

3.6.2 Funções objetivo adotadas

Nesta seção são apresentadas as funções objetivo utilizadas nas otimizações monoobjetivo e multiobjetivo.

3.6.2.1 Impedância característica

O cálculo da impedância característica (Z_c) da estrutura é obtido por meio das capacitâncias, conforme Equação 2.13, as quais podem ser calculadas por meio do MEF (calculando a energia elétrica armazenada em cada elemento). Deve-se ressaltar que, na abordagem adotada neste trabalho cada vez que um dos parâmetros do vetor \mathbf{x} é alterado, é necessário montar e resolver novamente o sistema de equações oriundo da aplicação do MEF, operações estas que são as principais responsáveis pelo consumo de tempo no processo de otimização.

A função objetivo foi formulada em termos da diferença relativa entre o valor desejado e o valor calculado, a fim de deixar esta função com a mesma ordem de magnitude das outras funções, o que irá servir na formulação da função multiobjetivo.

Impedância característica Z_c :

$$\text{Min } f_1(\mathbf{x}) = \left| \frac{Z_{ref} - Z_c}{Z_{ref}} \right|$$

com: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T$

onde: x_1 = distância entre eletrodos (G)

x_2 = espessura dos eletrodos laterais (T_e)

x_3 = espessura do eletrodo central (T_e)

x_4 = largura do eletrodo central (W_H)

x_5 = espessura da camada de *buffer* (T_b)

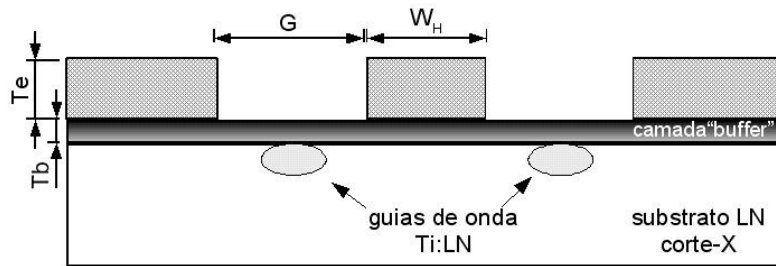


Figura 3.8 - Parâmetros geométricos do modulador eletroóptico utilizados nas otimizações das características.

3.6.2.2 Tensão de meia-onda

A tensão de meia-onda, V_π , é otimizada minimizando seu valor, o que é praticamente conseguido com a maximização de Γ , conforme Equação 2.14.

Tensão de meia onda V_π :

$$\text{Min } f_2(\mathbf{x}) = |V_\pi|$$

com: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T$

3.6.2.3 Largura de banda ou índice efetivo da onda elétrica

De forma similar, uma função objetivo para maximizar a largura de banda (Equação 2.17) significa minimizar a diferença entre os índices efetivos das ondas óptica e elétrica. Esse cálculo envolve, como no caso da impedância característica, uma relação entre as capacitâncias da estrutura (Equação 2.16).

$$\begin{aligned} &\text{Largura de banda } \Delta f: \\ &\text{Max } f_3(\mathbf{x}) = \Delta f \\ &\text{sujeito a: } \Delta f \leq f_{max} \\ &\text{com: } \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T \end{aligned}$$

Como a largura de banda está relacionada com a diferença entre os índices efetivos, a minimização do índice efetivo da onda elétrica pode ser utilizada, o que se traduz, indiretamente, na maximização da largura de banda:

$$\begin{aligned} &\text{Índice efetivo } N_m: \\ &\text{Min } f_{3A}(\mathbf{x}) = \left| \frac{N_m - N_o}{N_o} \right| \\ &\text{com: } \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T \end{aligned}$$

Aqui também, a função objetivo foi formulada em termos da diferença relativa, para manter a mesma ordem de magnitude das outras funções, o que irá servir na formulação da função multiobjetivo. Na aproximação adotada neste trabalho, o índice efetivo da onda óptica, N_o , permanece constante.

3.6.2.4 Potência de operação

A minimização da potência requerida pelo dispositivo (Equação 2.18) é outro fator importante, face à exigência de sistemas com maiores taxas de transmissão de dados. Com o aumento destas taxas, torna-se difícil a operação dos moduladores com tensões

altas, devido a restrições elétricas dos instrumentos. Deste modo, a redução da potência em moduladores com altas larguras de banda é fundamental na realização de sistemas de transmissão óptica de alta velocidade. Assim:

$$\begin{aligned} &\text{Potência } P_{\text{in}}: \\ &\text{Min } f_4(\mathbf{x}) = P_{\text{in}} \\ &\text{com: } \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T \end{aligned}$$

3.6.2.5 Função multiobjetivo

Do ponto de vista de otimização multiobjetivo, a função objetivo para esta categoria de problema é um agrupamento de pelo menos um par de funções. Caso se deseje um estudo mais complexo do modelo geométrico, é possível realizar um processo de otimização envolvendo a análise simultânea das quatro funções descritas acima e definida como:

$$\begin{aligned} &\text{Min } F(\mathbf{x}) \\ &\text{com: } F(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x}), f_4(\mathbf{x})]^T \\ &\quad \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T \end{aligned}$$

Se a variação das dimensões do campo óptico for considerada, ou seja, incluindo-se a influência dos parâmetros de construção do guia, as funções objetivo descritas acima ficarão dependentes destes parâmetros, tornando o estudo dos dispositivos ópticos mais completo, porém com aumento do custo computacional.

3.7 Algoritmo genético

Nesta seção é descrito o funcionamento de um Algoritmo Genético padrão e as implementações adotadas neste trabalho para seus diversos componentes. Ressalta-se que este algoritmo foi escolhido para a resolução do problema inverso por se tratar do

método mais comum aplicado a problemas de otimização, mostrando-se eficiente, confiável e de implementação simples. Muito embora os algoritmos apresentados na seção anterior pudessem gerar resultados similares, a implementação destes não fez parte do escopo deste trabalho.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma família de métodos computacionais inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. O primeiro destes esquemas foi introduzido por Holland (1975) e segue o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, de acordo com o ambiente em que os seres vivos estão inseridos. A operação de um Algoritmo Genético (AG) canônico é ilustrado na Figura 3.9.

```
P ← GeraPopulacaoInicial()  
Inicializa(P)  
Avalia(P)  
enquanto o critério de parada não for satisfeito faça  
    P' ← Recombina(P)  
    P'' ← Mutacao(P')  
    Avalia(P'')  
    P ← Substitui(P'')  
fim enquanto
```

Figura 3.9 - Algoritmo Genético canônico idealizado por Holland.

Estes algoritmos codificam uma solução potencial, para um problema específico, em uma estrutura de dados similar a um cromossomo e, por meio de aplicação de certos operadores de recombinação, as melhores soluções obtidas vão sendo preservadas.

Uma implementação de um AG é iniciada com um conjunto de cromossomos (normalmente gerados aleatoriamente), os quais formam uma população. Estes cromossomos são avaliados por algum critério e maiores oportunidades reprodutivas são alocadas aos cromossomos que representem melhores soluções para o problema. A solução mais promissora é definida, tipicamente, com respeito à população corrente.

A população de indivíduos, normalmente representados por cromossomos, são formados por vários genes. Cada parâmetro de otimização (x_i) é codificado por um gene,

usando-se uma representação apropriada, tal como um número real ou uma cadeia de bits. O conjunto dos genes, que correspondem aos parâmetros x_1, \dots, x_n (parâmetros geométricos do modulador) formam um cromossomo capaz de representar uma possível solução do problema. Um conjunto de cromossomos representando vários indivíduos (ou soluções) compõem uma população. Durante o processo de evolução, a população é avaliada e cada cromossomo é associado a um valor (valor de aptidão - “fitness value”), refletindo a qualidade da solução que ele representa (característica desejada). Os melhores (ou mais adaptados) cromossomos são selecionados para se combinarem (recombinação ou reprodução) e, por meio de troca de partes de seus genes (cruzamento ou “crossover”), geram descendentes (filhos) para a próxima geração, os quais são inseridos na população. Podem ser aplicadas, também, modificações (mutações) em indivíduos. Nestas mutações parte de seus genes são modificados a fim de melhorar a diversidade da população. Após essas etapas, o processo é reinicializado e repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada (Figura 3.10). Variantes do AG original introduziram um operador denominado elitismo, em que uma parte da população atual (os mais aptos) são transportados para a geração seguinte, preservando a qualidade da solução encontrada até o momento e aumentando a convergência do processo (HAUPT e HAUPT, 2004).

O valor de aptidão dos indivíduos é utilizado para se proceder à seleção daqueles que irão se cruzar para gerar a próxima geração. A aptidão pode ser obtida igualando-se ao valor da função objetivo, por meio de escalonamento da função objetivo, ordenamento dos indivíduos da população, entre outros.

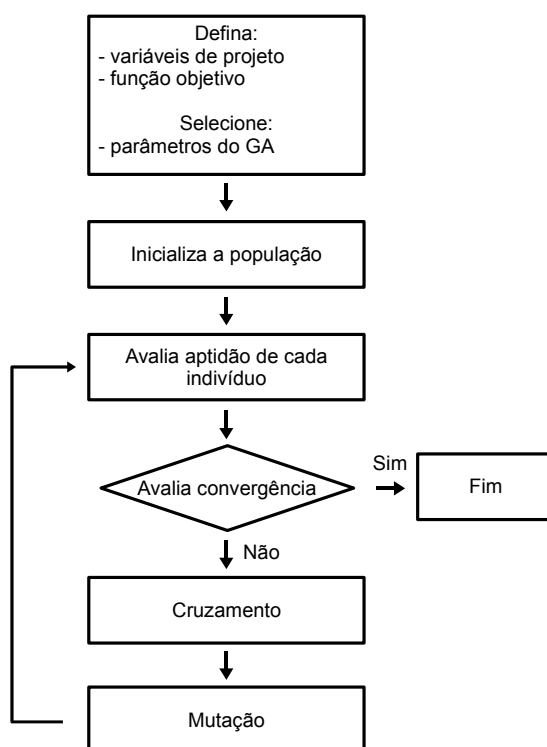


Figura 3.10 - Fluxograma de um Algoritmo Genético.

Os dois métodos mais comuns para a seleção são o método da roleta e o método do torneio. O método da roleta, o qual foi implementado neste trabalho, consiste na criação de uma roda de roleta, em que cada indivíduo (ou cromossomo) tem atribuído uma fração nesta roleta, que é proporcional a sua aptidão. Esta roleta é girada em número igual ao de indivíduos para determinar quais indivíduos serão selecionados. Como os indivíduos mais aptos têm atribuídos uma área maior da roleta, espera-se que eles sejam selecionados mais vezes do que aqueles menos aptos.

Uma vez realizada a escolha dos indivíduos para a reprodução, se procede com o cruzamento dos indivíduos selecionados. Nesta etapa, os selecionados trocam seus materiais cromossômicos e seus descendentes formarão a população da geração seguinte. O cruzamento se dá na forma do chamado ponto de corte. Como exemplo, para um ponto de corte, este é escolhido de maneira aleatória sobre a cadeia que representa o cromossomo e a partir deste ponto se faz o intercâmbio de material dos dois indivíduos, conforme mostra a Figura 3.11. A implementação usada neste trabalho

permite a escolha de um ou mais pontos de corte.

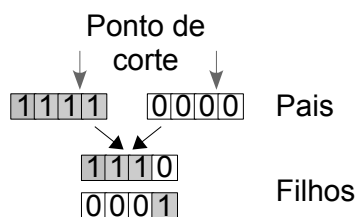


Figura 3.11 - Uso de um ponto de corte entre dois indivíduos.

O cruzamento entre os pares de indivíduos normalmente ocorre de acordo com uma probabilidade que indica com que frequência isto será efetuado. A utilização desta probabilidade de cruzamento (pc) faz com que alguns dos bons indivíduos selecionados para reprodução não participem do cruzamento, sendo preservados e simplesmente copiados para a nova população, ou seja, se esta probabilidade for usada, então $100pc\%$ dos indivíduos são usados na operação de cruzamento e o restante $100(1-pc)\%$ são transportados para a nova população, sem modificações.

A mutação é outro operador utilizado no AG, que permite a introdução de um novo indivíduo na população, melhorando a diversidade da população. Se o AG não consegue convergir para uma solução satisfatória, diz-se que o algoritmo convergiu prematuramente. Quando uma representação binária é utilizada na construção dos cromossomos, um ou mais bits são selecionados e substituídos por seus complementos (zero é trocado por um e vice-versa). A mutação nos indivíduos ocorre de acordo com uma probabilidade, tal como ocorre no cruzamento, porém com uma frequência mais esporádica, normalmente não superando a 5% (HAUPT e HAUPT, 2004; FOUSKAKIS e DRAPER, 2001).

A fim de preservar a qualidade da solução encontrada até a presente geração, uma outra técnica foi desenvolvida, de modo a permitir que o indivíduo mais apto seja transportado para a geração seguinte, se mantendo intacto. Esta técnica chamada de elitismo foi implementada no algoritmo deste trabalho, de maneira a transportar um ou mais indivíduos, que apresentem as melhores aptidões.

O critério de parada para o algoritmo é um ponto importante, porém não há um consenso sobre qual o melhor critério (HAUPT e HAUPT, 2004). Com base na literatura e testes, este trabalho adotou dois critérios para o término da execução do algoritmo genético. O primeiro se relaciona com a variação da população, ou seja, se 51% da população apresentar o mesmo cromossomo ou função objetivo, a execução é terminada. O segundo critério é a limitação do número de gerações. Se o algoritmo não parar pelo primeiro critério, ao atingir um número máximo de gerações pré-fixado, o algoritmo deixa de ser executado. Estes critérios estão associados à evolução da melhoria da qualidade das soluções, no primeiro caso, e a um tempo viável de execução do processo, no segundo caso.

3.7.1 Algoritmo genético implementado

O processo de otimização implementado neste trabalho é composto por duas ferramentas: um algoritmo de análise das soluções candidatas (o problema direto) e um algoritmo de busca (o problema inverso), o qual propõe e seleciona soluções, de maneira a atingir uma solução ótima. A solução do problema inverso é obtida por meio de um processo iterativo (abordagem implícita), em que as soluções candidatas são sucessivamente geradas e avaliadas por meio das equações do modelo direto. As soluções candidatas da fase inicial são geradas de maneira aleatória. As soluções posteriores utilizam sempre as soluções da fase anterior para gerar as novas soluções candidatas, as quais são, em geral, mais aprimoradas que as soluções antecessoras.

Neste trabalho foi utilizado um AG padrão como método de solução para o problema inverso e o MEF, com formulação 2D, para a resolução do problema direto. A Figura 3.12 apresenta o diagrama do processo de otimização utilizado, com seus elementos.

A busca pelas soluções ótimas utiliza como funções objetivo, as funções descritas na seção 3.4.2, buscando por soluções que possuam a maior aptidão o que, para este trabalho, significa a minimização das funções. Na otimização monoobjetivo, somente uma função é otimizada. Para a otimização multiobjetivo, a combinação de duas ou

mais funções é utilizada. A escolha para a construção das funções objetivo levou em conta o usuário final que poderá utilizar esta implementação. A minimização das funções reflete diretamente as características desejadas pelos projetistas destes dispositivos como, por exemplo, a minimização da função objetivo para a impedância característica é a procura direta pelo casamento de impedância entre o dispositivo e a fonte de microondas.

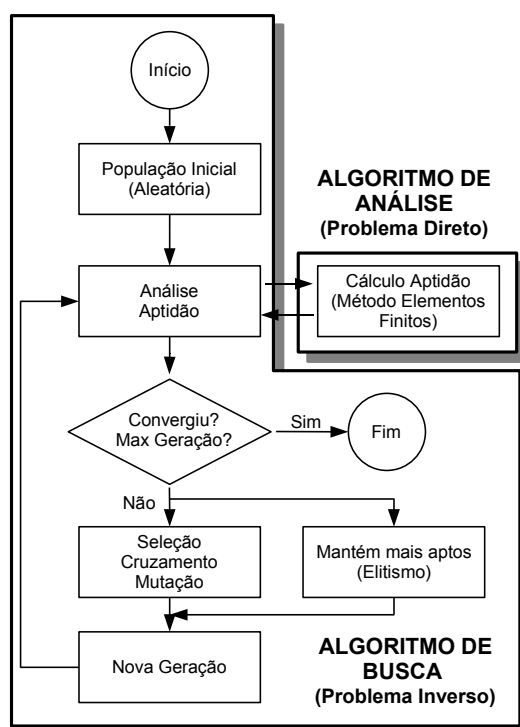


Figura 3.12 - Algoritmo Genético implementado nesse trabalho.

A implementação do AG adotada neste trabalho, utiliza uma codificação binária para representar os parâmetros de projeto. Cada parâmetro de projeto é formado por uma seqüência de bits e agregadas uma após a outra, formando um cromossomo, cujo tamanho irá depender dos parâmetros utilizados em cada problema de otimização. As seqüências de bits, correspondente a cada parâmetro, são posteriormente convertidas para números reais, com a finalidade de informar à maquina de cálculo do modelo direto quais regiões do modelo geométrico original devem sofrer modificações de material ou condições de contorno. Uma função de adequação de limites se encarrega de

verificar e colocar as soluções candidatas dentro dos limites pré-estabelecidos para as configurações (como será mostrado em detalhes no Capítulo 4), após a conversão. A codificação adotada para as otimizações monoobjetivo e multiobjetivo é mostrada na Figura 3.13.

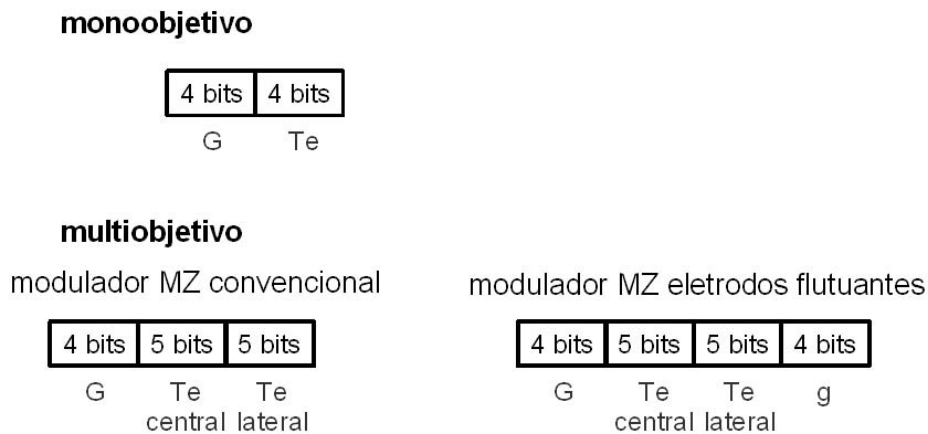


Figura 3.13 - Esquema de codificação adotado para o AG implementado.

O cálculo da aptidão implementado neste trabalho, foi baseado no escalonamento linear dos indivíduos. O uso da função objetivo como aptidão, pode ocasionar falta de resolução do AG para diferenciar os melhores dos piores indivíduos, no caso em que as funções objetivos tenham valores muito próximos. Como consequência, a seleção torna-se aleatória e a convergência é lenta. No método do escalonamento linear, o intervalo da aptidão é expandido e, utilizando-se a Equação 3.9, são atribuídos valores de aptidão aos indivíduos previamente ordenados de acordo com o valor decrescente de suas respectivas funções objetivo.

$$aptidao_i = min + (max - min) \frac{(N - i)}{(N - 1)} \quad (3.9)$$

com i o índice do cromossomo da população em ordem decrescente do valor da função objetivo e N o número de indivíduos da população.

O termo $(max - min)$ da Equação 3.9 é denominado pressão de seleção e o valor desta

pressão controla o comportamento do AG, ou seja, uma baixa pressão de seleção favorece a exploração de novas regiões do espaço de soluções, permitindo a escolha de indivíduos com baixa aptidão (diversidade da população) e, por outro lado, uma alta pressão de seleção favorece a busca local, utilizando informações das soluções obtidas anteriormente, a fim de encontrar melhores soluções nesta vizinhança. Neste trabalho foi utilizado uma pressão de seleção padrão e fixa para todas as gerações, com valor de 2 (DEB, 2001).

Na seleção dos indivíduos foi utilizado o método da roleta (“roulette wheel”), o qual é baseado na aptidão dos indivíduos, para gerar a população intermediária a ser usada na etapa de cruzamento. O operador de cruzamento implementado permite a escolha de um ou mais pontos de corte, escolhidos arbitrariamente. Foram realizados testes exploratórios com vários pontos de cortes e optou-se pelo uso de 1 ponto de corte. A taxa de cruzamento foi fixada em 80%, ou seja, foi adotado 0,8 de probabilidade para ocorrência de cruzamento entre os pares escolhidos durante a seleção dos indivíduos.

O operador de mutação implementado neste trabalho analisa todos os indivíduos gerados após a etapa de cruzamento. Todos os bits são verificados e cada um deles é ou não alterado, de acordo com uma porcentagem pré-estabelecida. Foram exploradas taxas variando entre 5 a 15% e optou-se pelo emprego de uma taxa de 5%, pois com porcentagens maiores a população foi muito alterada e não se conseguiram resultados satisfatórios para os valores das funções objetivo.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os valores calculados, por meio do modelo direto utilizado neste trabalho, de características de moduladores eletroópticos apresentados na literatura, com a finalidade de validar o método utilizado nos cálculos. Também são apresentados e analisados os dados obtidos com os processos de otimização, monoobjetivo e multiobjetivo, aplicado ao problema do modulador LN-MZ, para uma configuração convencional e com eletrodos flutuantes.

4.1 Processamento paralelo

Devido à complexidade da configuração do modulador eletroóptico, quase todo o tempo de execução computacional gasto pelo processo de otimização, é despendido pelo cálculo direto para obter as grandezas relevantes de cada solução. Para diminuir o tempo computacional, o processo de otimização foi implementado de maneira a ser executado em um ambiente de processamento paralelo. Para tanto, neste trabalho foi utilizada uma implementação paralela do AG para execução em ambiente paralelo com memória distribuída. O esquema adotado foi o denominado “master-slave” (WEISE, 2007) , em que uma máquina centraliza o processo do AG (máquina “master”) e envia as soluções candidatas às outras máquinas, denominadas nós (“slaves”), para avaliações paralelas. A máquina paralela utilizada é composta por um conjunto de 11 micro-computadores, com a mesma configuração: processadores AMD Athlon© Barton 2500+ (1.6 GHz) e 1 GB de memória RAM. A interligação das máquinas é por meio de uma “switch” Fast-Ethernet de 100 Mb/s. Na paralelização do algoritmo foi empregada a implementação MPICH da biblioteca de comunicação “Message Passing Interface” - MPI (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2006). O sistema operacional (SO) utilizado é o Linux Debian 3.1, “kernel” versão 2.4.26.

Não foram realizados testes formais de desempenho nas duas máquinas, pois aplicações de outros usuários também estavam sendo executadas durante o processo de otimização. Porém, foi possível obter uma média de tempo, com base em todas as simulações

realizadas.

A máquina com SO Linux obteve a solução para o modelo direto, de cada configuração proposta, em aproximadamente 1,5 minutos. Neste trabalho adotou-se um critério manual de distribuição dos indivíduos, de forma a manter sempre 2 indivíduos por máquina em cada geração, provendo um balanceamento de carga implícito. Com isso, obteve-se um tempo aproximado de 3 minutos por geração. Vale ressaltar que um efetivo balanceamento de carga não foi obtido, uma vez que os processos concorrentes invariavelmente sobrecarregaram as máquinas de maneiras diferenciadas.

O que se pode comentar sobre “speedup” teórico da máquina com SO Linux é que a adoção do esquema “master-slave” em princípio leva a um desempenho linear (PACHECO, 1997), ou seja, quanto maior o número de nós, menor o tempo de avaliação, para um mesmo número de indivíduos (Desde que o número de indivíduos seja maior que o número de máquinas).

Quantificando o que foi dito acima, as otimizações monoobjetivo tiveram o fim da execução entre 25 a 50 gerações, resultando entre 1,5 a 2,5 horas de simulação. Transportando estes valores para uma única máquina e população de 20 indivíduos, tem-se uma estimativa de 30 minutos por geração, totalizando entre 12 a 25 horas de cálculos.

No decorrer deste trabalho foram realizados estudos sobre a viabilidade de se paralelizar também o MEF com respeito a resolução do sistema esparso de equações lineares (PASSARO et al., 2006; MURARO et al., 2004). Diversos esquemas de comunicação foram testados para 70 000 e 180 000 equações e chegou-se à conclusão que o tempo de comunicação foi o fator de maior impacto. Com isso, “speedups” modestos (em torno de 2) foram alcançados somente no conjunto de micro-computadores utilizando uma rede Gigabit (1 Gb/s). Desta forma, este tipo de paralelismo não foi utilizado neste trabalho, mas as informações obtidas poderão servir de base para trabalhos futuros, utilizando um maior número de equações, significando que o tempo de cálculo teria um

impacto maior do que o tempo de comunicação.

4.2 Avaliação da implementação para o modelo direto

A avaliação da implementação computacional do modelo direto é uma fase importante, deste trabalho pois permite determinar a acurácia das soluções tentativas geradas. O procedimento de avaliação adotado foi o estudo de caso comparativo para duas configurações de moduladores descritos na literatura.

4.2.1 Modulador com eletrodos flutuantes

No artigo de Franco et al. (1999b) é analisado um modulador LN-MZ com eletrodos flutuantes, conforme mostrado na Figura 2.5 Para o estudo de caso, foi simulada a influência da distância entre os eletrodos (G) para Z_c e N_m , mantendo-se constante a distância entre os eletrodos flutuantes ($g = 5 \mu\text{m}$).

A Figura 4.1 mostra os valores calculados com a implementação utilizada neste trabalho e os apresentados no artigo. Observa-se que os resultados estão com boa concordância com os do artigo, já que todos os detalhes construtivos e geométricos deste dispositivo puderam ser obtidos, o que permitiu uma simulação fiel.

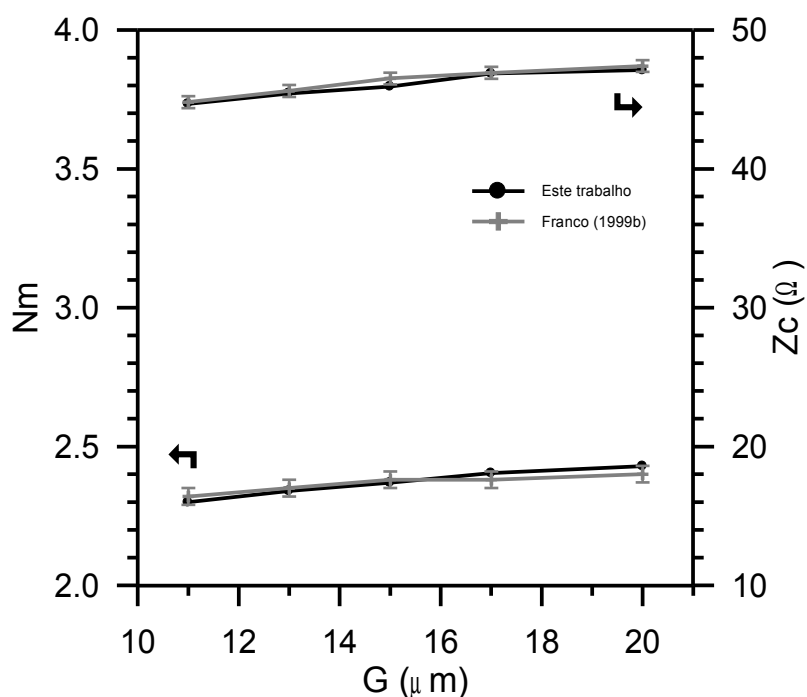


Figura 4.1 - Estudo da influência de G para Z_c e N_m . Comparação de resultados com a literatura (FRANCO, 1999b). Distância entre os eletrodos flutuantes $g = 5 \mu\text{m}$.

4.2.2 Modulador com estrutura “back-slot”

Uma proposta de um novo modelo de modulador eletroóptico, recentemente divulgado na literatura é o denominado “back-slot” (AOKI et al., 2004; KONDO et al., 2001; KONDO et al., 2002a; KONDO et al., 2002b; MINAKATA, 2001).

Este modelo possui recortes no substrato LN a fim de conseguir um casamento de velocidade ($N_o = N_m$), eliminando a camada de “buffer” de SiO_2 , que ocasiona um problema de flutuação da tensão de polarização. Além disso, este modelo permite atingir baixos valores de tensão de meia-onda (V_π) e baixa perda de inserção óptica. A Figura 4.2 apresenta o modelo do modulador, conforme proposto em Kondo et al. (2002b).

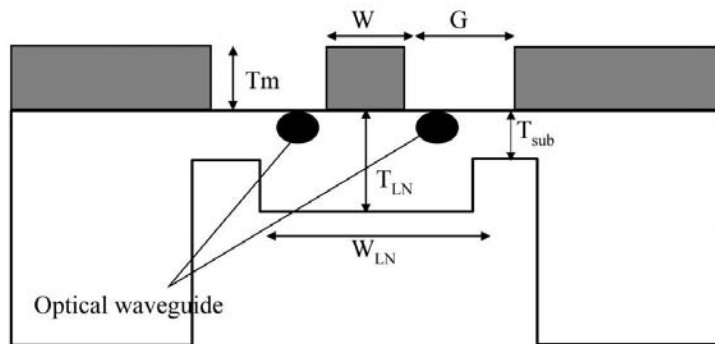


Figura 4.2 - Modulador LN, corte-X, com estrutura "back-slot" de dois patamares. W : largura do eletrodo central; G distância entre os eletrodos; T_m : espessura dos eletrodos; T_{LN} : espessura ao redor dos guias ópticos; W_{LN} : largura de T_{LN} e T_{sub} : espessura do substrato nas proximidades dos eletrodos laterais.

Fonte: Kondo et al. (2002b).

As informações apresentadas em Kondo et al. (2002b) foram utilizadas para comparação com a implementação do MEF, utilizada neste trabalho, para análise eletromagnética deste modelo de modulador.

As análises das características do projeto, como o índice efetivo da onda eletromagnética (N_m), a impedância característica (Z_c) e a tensão de meia-onda (V_π), em função dos parâmetros construtivos do dispositivo foram comparadas, variando-se o número de elementos da malha (5 000 e 14 000 elementos) e considerando ou não a anisotropia dos materiais do dispositivo. Os dados para comparação foram obtidos da *figura 3* de Kondo et al. (2002b), correspondendo a $G = 40 \mu\text{m}$ e $W_{LN} = 90 \mu\text{m}$ e em função da variação de T_{sub} .

Os primeiros conjuntos de dados, obtidos sem o tratamento da anisotropia dos materiais, apresentaram uma divergência, notadamente para o caso de N_m com uma discrepância média de 12%. Este comportamento foi verificado nas duas malhas de elementos finitos. De fato, a variação de valores entre a malha mais grosseira e a mais refinada foi menor do que 2,0%, em qualquer das características comparadas. Levando-se em conta que as formulações adotadas nas duas implementações são iguais, em princípio, o tratamento

da anisotropia foi o fator relevante para a não coincidência dos resultados.

Introduzindo-se o tratamento da anisotropia dos materiais, os resultados foram mais próximos dos de Kondo et al. (2002b). O N_m ficou com uma diferença média de 1,7% e Z_c apresentou um ligeiro distanciamento (diferença média de 6,5%), o que é justificado pela natureza antagonica destas duas características.

Os resultados das avaliações são apresentados nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5. Observa-se que os dados de Kondo et al. (2002b) possuem barras de erros, devido a obtenção por inspeção visual de alguns parâmetros.

A ausência de informação de alguns parâmetros impossibilitou que o modelo do artigo fosse fielmente simulado. A curva para V_π é um exemplo disto. Esta característica é dependente do campo da onda óptica, conforme mostrado na Equação 2.14. Como os parâmetros construtivos e a posição não são comentados no artigo, foram assumidos os mesmos parâmetros e posição (metade da distância entre os eletrodos) utilizados nas simulações deste trabalho. Estudos variando a posição horizontal do guia mostraram que colocando-se o guia a aproximadamente 1/5 de distância do eletrodo central as curvas se ajustam (Figura 4.6).

Com relação a Z_c e N_m , as duas implementações utilizam o MEF para cálculo das grandezas relevantes, porém a formulação usada para a obtenção das capacitâncias não é detalhada no artigo. Neste trabalho, as capacitâncias são obtidas por meio da energia calculada em cada elemento finito. Observa-se portanto que as curvas não tiveram um casamento perfeito, porém o aspecto mais importante é analisar a tendência ou comportamento destas curvas. Com os resultados obtidos foi possível obter curvas que reproduzem o mesmo comportamento das curvas citadas no artigo.

A concordância da curva de V_π após o ajuste da posição do guia óptico e a reprodução do perfil da curva para os gráficos de Z_c e N_m , oferece a segurança necessária de que o método utilizado no modelo direto permite obter comportamentos e soluções

compatíveis com os citados na literatura.

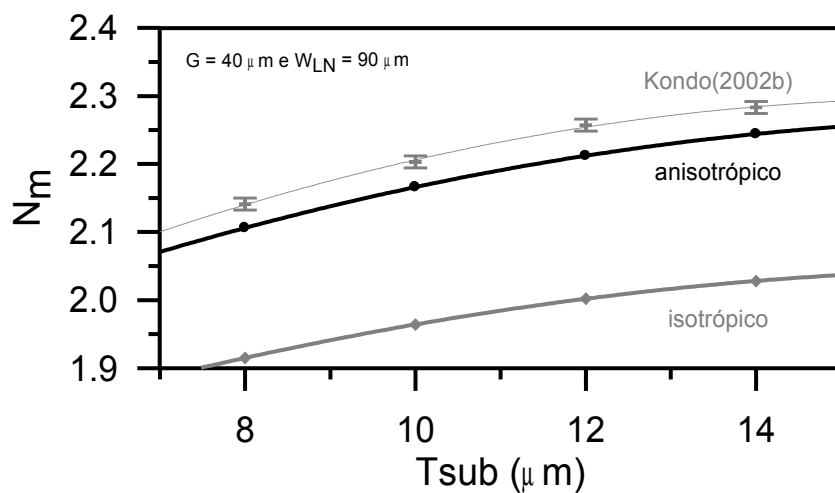


Figura 4.3 - Variação do índice efetivo da onda eletromagnética (N_m) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura "back-slot".

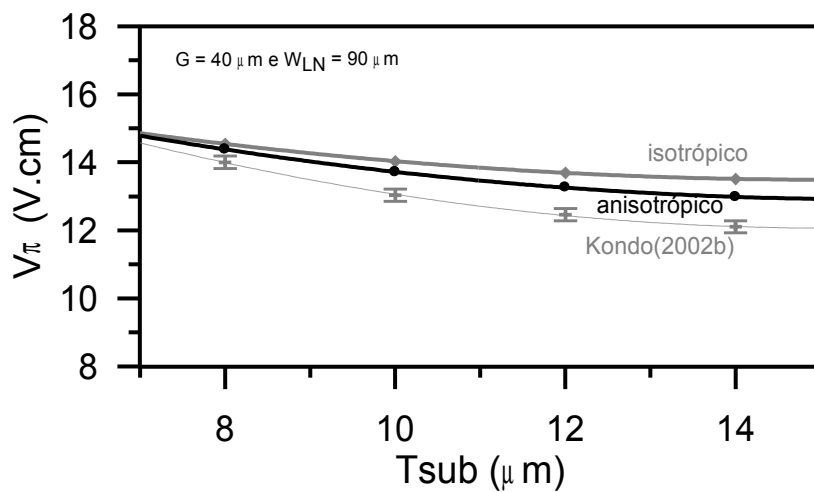


Figura 4.4 - Variação da tensão de meia-onda (V_π) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura "back-slot".

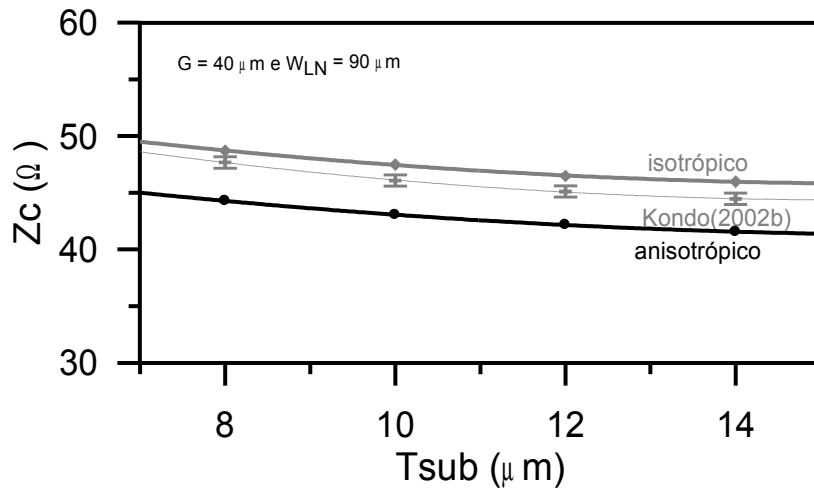


Figura 4.5 - Variação da impedância característica (Z_c) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura “back-slot”.

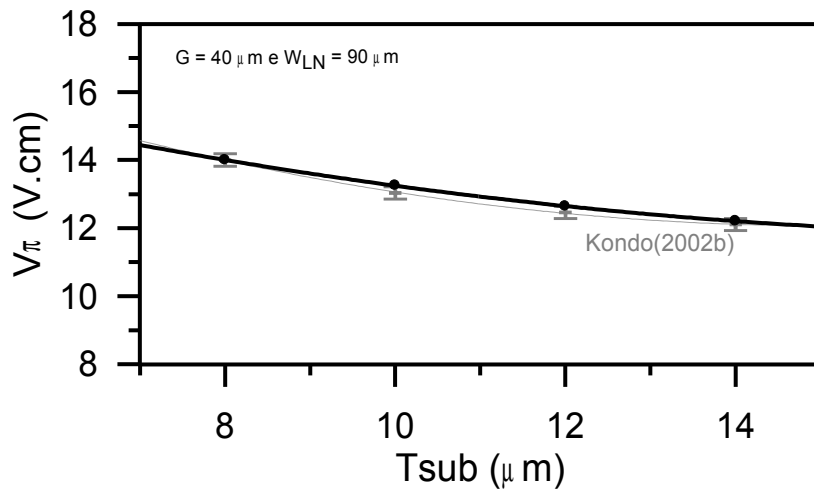


Figura 4.6 - Variação da tensão de meia-onda (V_π) em função de T_{sub} , para um modulador com estrutura “back-slot”. Campo óptico mais próximo do eletrodo central.

Concluindo, os dois casos de estudo (modulador com eletrodos flutuantes e “back-slot”) foram reproduzidos de maneira aceitável. Assim, a formulação implementada no modelo direto pôde obter os resultados com a confiabilidade necessária.

4.3 Otimização monoobjetivo

Para verificar a eficiência do processo de otimização em obter a melhor solução ou valores próximos, a implementação foi testada para o caso de um modulador LN-MZ convencional. O AG operou com uma população inicial de 22 indivíduos, a técnica de roleta foi utilizada para o operador de seleção e um ponto de corte para o operador de cruzamento. A probabilidade de ocorrência para o cruzamento foi de 0,8 e a ocorrência de mutação foi de 0,05. Elitismo de 4 indivíduos foi aplicado. Este conjunto de opções foi escolhido com base em testes de convergência e tempo de execução. Os resultados destes testes não são discutidos neste trabalho.

O processamento paralelo foi empregado nestes testes, visando diminuir o tempo computacional. O tempo gasto pelo modelo direto para o cálculo das características de cada configuração proposta foi de aproximadamente 1,5 minutos. O processo de otimização foi configurado de modo que cada nó da máquina paralela avaliasse dois indivíduos por geração. Portanto, cada geração foi obtida em 3 minutos, na média. Ressalta-se aqui que esta máquina paralela não foi utilizada exclusivamente para o processo de otimização, com sua execução concorrendo algumas vezes com a execução de outros programas. Este tipo de operação justifica-se, uma vez que o objetivo principal deste trabalho foi a busca por soluções ótimas para o problema dos moduladores eletroópticos e não medidas de desempenho para o processo de otimização.

Dois parâmetros de projeto, a distância (G) e a espessura dos eletrodos (Te) (Figura 4.7) foram usados para codificar genes de 4 bits. Estes genes foram agregados um após o outro, formando cromossomos de 8 bits para cada indivíduo. Os limites adotados para esta configuração foram:

$$\begin{aligned}5 \mu\text{m} &\leq G \leq 35 \mu\text{m} \\15 \mu\text{m} &\leq Te \leq 30 \mu\text{m} \\Tb &= 0,2 \mu\text{m}\end{aligned}$$

A largura do eletrodo central (W_H) também apresenta variação na sua dimensão ($6 \mu\text{m} \leq W_H \leq 36 \mu\text{m}$), pois no modelo geométrico do modulador, construído para as análises de otimização, esta largura é dependente da distância entre eletrodos; aumentando-se G , diminui W_H e vice-versa.

O índice efetivo da onda óptica $N_m = 2,142$, usado nas Equações 2.16 e 2.17, foi obtido com o uso do MEF no cálculo de guias de onda difusos e utilizado em todos os testes com esta configuração.

Para o intervalo de parâmetros listados acima, o espaço de busca possui 256 possíveis soluções candidatas. A princípio, este espaço de busca reduzido ou restrito poderia ser totalmente mapeado via um algoritmo de força bruta, porém estes primeiros testes de otimização tiveram o objetivo de avaliar o comportamento do AG com relação a convergência das soluções e robustez para conseguir uma solução ótima. Os dados obtidos permitiram ter a segurança necessária para empregar esta implementação em um processo mais complexo, como a otimização multiobjetivo, no qual o espaço de busca utilizado foi maior e será descrito à frente.

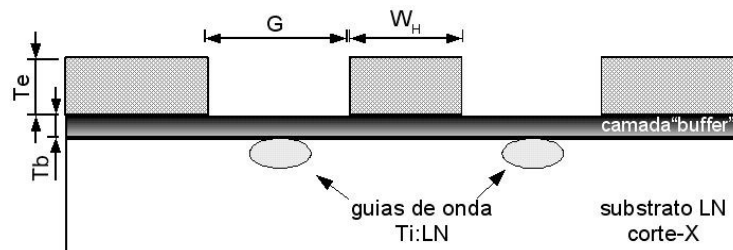


Figura 4.7 - Corte transversal de um modulador MZ, com três eletrodos. W_H : largura do eletrodo central; G : distância entre os eletrodos; T_e : espessura dos eletrodos e T_b : espessura da camada de "buffer".

A impedância característica (Z_c) do modulador foi a primeira característica otimizada. O objetivo principal desta otimização foi encontrar uma configuração de modulador que proporcionasse Z_c tão próximo quanto possível da impedância das fontes comerciais de microondas, normalmente 50Ω . Na Figura 4.8 é mostrada a variação da função objetivo

em função do número de gerações, fornecendo um indicativo da convergência para esta otimização. Observa-se que a partir da 15ª geração o valor da função objetivo tem uma queda pronunciada e a partir da 40ª geração houve a estabilização das soluções. O critério de parada para esta otimização foi por número máximo de gerações (80 gerações), totalizando aproximadamente 4 horas de execução.

Utilizando a função objetivo mostrada na Equação 4.1, o processo de otimização conseguiu atingir um valor próximo ao desejado (0,55%), dado o conjunto de parâmetros escolhido. O melhor valor para Z_c obtido, bem como os parâmetros geométricos associados estão apresentados na Tabela 4.1.

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = (Z_{ref} - Z_c)^2 \quad (4.1)$$

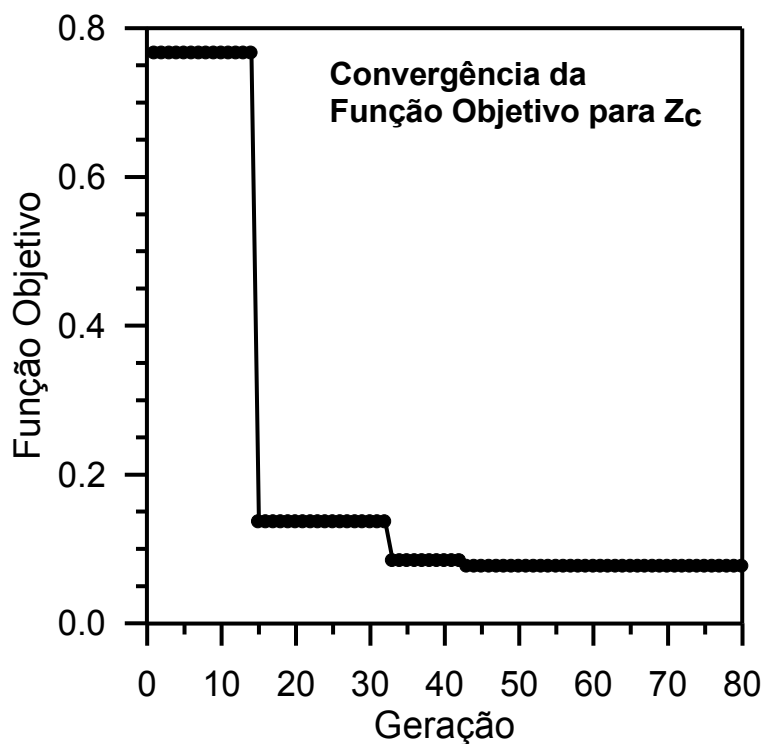


Figura 4.8 - Variação da função objetivo em função do número de gerações, para Z_c . Curva para o melhor indivíduo de cada geração e elitismo de 4 indivíduos.

Tabela 4.1 - Melhor valor obtido para otimização de Z_c .

Característica otimizada	$Z_c = 49,7240 \Omega$
Distância eletrodos (G)	35 μm
Espessura eletrodos (Te)	26 μm
Largura eletrodo central (W_H)	6 μm
Espessura camada "buffer" (Tb)	0,2 μm
V_π	19,3898 V.cm
N_m	2,4096

Observa-se na tabela acima que a tentativa de otimizar Z_c resultou em valores não desejáveis para as outras características. É um fato a busca por dispositivos operando com baixos valores de V_π (TWU et al., 2007), e o valor conseguido para esta configuração é alto, até mesmo se for comparado com dispositivos publicados anteriormente (ALFENESS, 1982).

Na seqüência, a tensão de meia-onda (V_π) foi a característica otimizada pelo processo de otimização. A função objetivo utilizada é apresentada pela Equação 4.2. O número de gerações foi fixado em 25, sendo este o critério de parada adotado. O tempo médio de execução deste processo foi de aproximadamente 1,5 horas.

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = |V_\pi| \quad (4.2)$$

Para esta característica, o processo de otimização procurou encontrar configurações que proporcionassem o menor V_π . O melhor valor obtido é mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Melhor valor obtido para otimização de V_π .

Característica otimizada	$V_\pi = 3,2636 \text{ V.cm}$
Distância eletrodos (G)	$5 \mu\text{m}$
Espessura eletrodos (Te)	$30 \mu\text{m}$
Largura eletrodo central (W_H)	$36 \mu\text{m}$
Espessura camada "buffer" (Tb)	$0,2 \mu\text{m}$
Z_c	$12,1288 \Omega$
N_m	$1,8720$

Um bom valor para V_π foi conseguido, comparável à valores da literatura (AOKI et al., 2004), mas também com perdas nas outras características. O valor para Z_c é aproximadamente 1/4 do valor desejado (50Ω) para um perfeito casamento de impedância.

Outro teste com o processo de otimização envolveu o índice efetivo da onda eletromagnética (N_m). A Figura 4.9 mostra a taxa de convergência do processo, indicando uma convergência e estabilização das soluções a partir da 5ª geração, com resultado final de 0,26% do valor desejado (N_o), utilizando a função objetivo apresentada na Equação 4.3. A Tabela 4.3 mostra o melhor valor de N_m e os parâmetros geométricos associados. O critério de parada foi por número máximo de gerações, fixado em 25 gerações. O tempo médio de execução foi de aproximadamente 1,5 horas.

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = \left(\frac{N_m - N_o}{N_o} \right)^2 \quad (4.3)$$

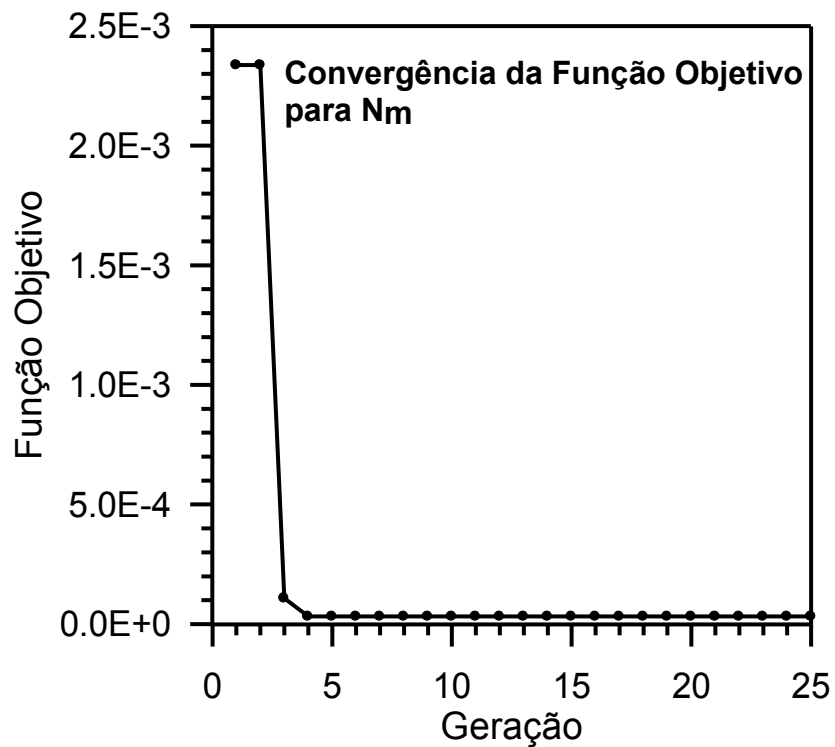


Figura 4.9 - Variação da função objetivo como função do número de gerações, para N_m . Curva para o melhor indivíduo e elitismo de 4 indivíduos.

Tabela 4.3 - Melhor valor obtido para otimização de N_m .

Característica otimizada	$N_m = 2,1367$
Distância eletrodos (G)	7 μm
Espessura eletrodos (T_e)	23 μm
Largura eletrodo central (W_H)	18 μm
Espessura camada "buffer" (T_b)	0,2 μm
Z_c	16,4559 Ω
V_π	3,9043 V.cm

Nesta tabela, observa-se que além de N_m , o valor encontrado para V_π é aceitável, mas a configuração obtida não consegue atingir o casamento de impedância.

Os dados das Tabelas permitem observar que o algoritmo de busca é robusto suficiente para conseguir buscar soluções ótimas bem próximas do valor desejado (0,55% para Z_c e 0,26% para N_m). Os dados também reproduzem o comportamento citado na literatura sobre o antagonismo das características, ou seja, melhorando uma das características as outras têm seus valores degradados. Isto tem relação direta com os parâmetros geométricos do dispositivo. O aumento da distância entre os eletrodos, por exemplo, favorece Z_c , mas degrada V_π , comportamento este estudado em Muraro et al. (2005).

4.4 Otimização multiobjetivo

A utilização de soluções do tipo Pareto-ótimo é mais conveniente em problemas de engenharia porque estas soluções provêm diferentes balanceamentos entre as características de um dispositivo a ser otimizado. A otimização simultânea de duas ou mais características fornece informações mais detalhadas sobre a interação destas características, muitas vezes conflitantes.

4.4.1 Método da soma ponderada (“weighted sum method”)

O primeiro método, para obtenção destas soluções, foi o Método da Soma Ponderada por ser simples e permitir a resolução de vários problemas multiobjetivo. O Algoritmo Genético ficou encarregado de procurar as possíveis soluções no espaço de busca do problema. Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros: técnica da roleta e corte de 1 ponto para a seleção e cruzamento, respectivamente; as probabilidades de cruzamento e de mutação foram de 0,8 e de 0,05, respectivamente; elitismo de 1 indivíduo. Testes com outros parâmetros foram realizados com resultados similares e pequenas diferenças na taxa de convergência. O esquema “master-slave” para o processamento paralelo foi utilizado em todas as análises subsequentes. O tempo despendido para a avaliação de um indivíduo foi de

aproximadamente 1,5 minutos e cada geração foi avaliada a cada 3 minutos em média, considerando 2 indivíduos avaliados por nó, resultando em um tempo de execução de aproximadamente 10 horas.

A seguir, serão apresentados os resultados de dois experimentos multiobjetivo. O primeiro corresponde à otimização de um modulador tipo MZ convencional. Três parâmetros de projeto, a distância entre eletrodos, a espessura do eletrodo central e a espessura dos eletrodos laterais (Figura 4.7) foram usados para codificar os cromossomos de cada indivíduo. O intervalo de valores para estes parâmetros foram escolhidos levando-se em conta os atuais limites tecnológicos de fabricação.

Outra estrutura de modulador utilizada para o estudo multiobjetivo foi o modulador com eletrodos flutuantes (FRANCO et al., 1999b; HOPFER et al., 1998), o qual é baseado na configuração de um modulador tipo MZ convencional, mas com um conjunto de três eletrodos extras com espessura muito fina e sem conexão elétrica com algum outro componente do modulador, depositados acima do substrato LN e abaixo da camada de “buffer” (Figura 4.10). Neste caso, quatro parâmetros de projeto (distância entre eletrodos, a espessura do eletrodo central, a espessura dos eletrodos laterais e distância dos eletrodos flutuantes) foram usados na codificação dos cromossomos dos indivíduos.

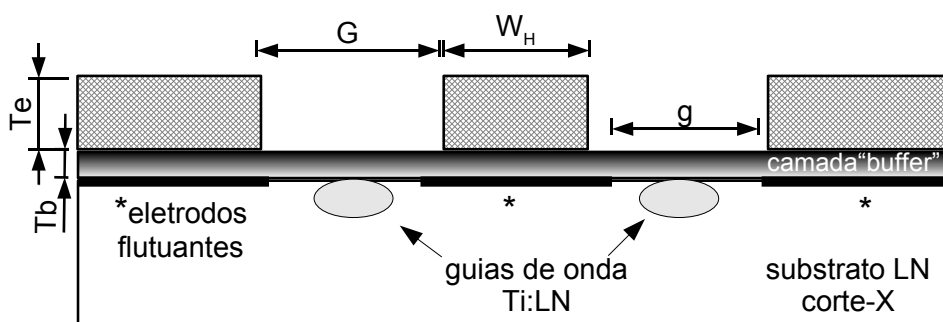


Figura 4.10 - Corte transversal de um modulador MZ, com três eletrodos convencionais e eletrodos flutuantes. W_H : largura do eletrodo central; G : distância entre os eletrodos; T_e : espessura dos eletrodos; T_b : espessura da camada de “buffer” e g : distância entre os eletrodos flutuantes.

Os limites adotados em ambas as configurações foram:

$$\begin{aligned}
5 \mu\text{m} &\leq G \leq 35 \mu\text{m} \\
4 \mu\text{m} &\leq T_e \leq 30 \mu\text{m} \\
T_b &= 1,2 \mu\text{m}
\end{aligned}$$

e, para a configuração de eletrodos flutuantes, a distância entre os eletrodos flutuantes (g):

$$5 \mu\text{m} \leq g \leq 35 \mu\text{m}.$$

Como comentado na seção 4.3, a variação da largura do eletrodo central ($6 \mu\text{m} \leq W_H \leq 36 \mu\text{m}$) é dependente da distância entre eletrodos (G). A implementação permite também que a espessura dos eletrodos laterais possam variar independentemente da espessura do eletrodo central, no mesmo intervalo de W_H .

Para os intervalos acima, o espaço de busca para um modulador tipo MZ convencional possui 11 664 possíveis soluções (considerando a variação independente da espessura dos eletrodos) e um modulador com eletrodos flutuantes possui 186 624 possíveis soluções.

No estudo da otimização multiobjetivo, o índice efetivo da onda óptica $N_m = 2,142$, utilizado nas Equações 2.16 e 2.17, foi obtido usando-se também o MEF no cálculo de guias de onda difusos, como apresentado em Franco et al. (1999a).

As Figuras 4.11 a 4.18 mostram os resultados obtidos nos vários experimentos de otimização multiobjetivo, com diferentes pares de características.

As tabelas incluídas nas Figuras 4.11 e 4.13 e de 4.15 a 4.18 mostram características otimizadas em três pontos sobre a fronteira de Pareto (**A**, **B** e **C**). Observa-se que o intervalo de valores obtidos, para cada característica, é amplo. Em termos do conceito de Pareto, todas as soluções que estão na fronteira de Pareto são predominantes sobre as outras soluções, mas a escolha específica de uma delas pode depender de fatores adicionais, tais como a confecção do modelo geométrico, o consumo de potência, perdas devido ao acoplamento, aplicação e outros. Obviamente estes fatores podem ser

incluídos no processo de otimização, se for desejável, seja como características ou restrições do problema, com o conseqüente aumento da complexidade do problema.

Em um primeiro passo, duas características do modulador tipo MZ convencional foram otimizadas ao mesmo tempo, V_π e Z_c . O melhor valor buscado para a primeira característica foi 0 Volts. Para a segunda característica buscou-se alcançar uma impedância de 50Ω para o dispositivo, o que corresponde ao valor de impedância de saída das fontes de microondas comerciais, minimizando, portanto, a reflexão do sinal de entrada. Estas duas características formaram uma clara fronteira Pareto-ótimo para este problema, conforme mostrado na Figura 4.11. O conjunto de soluções ótimo converge para a fronteira de Pareto e uma distribuição espaçada e pouco adensada foi obtida, assegurando um bom conjunto de soluções balanceadas, provendo um compromisso entre os diferentes objetivos.

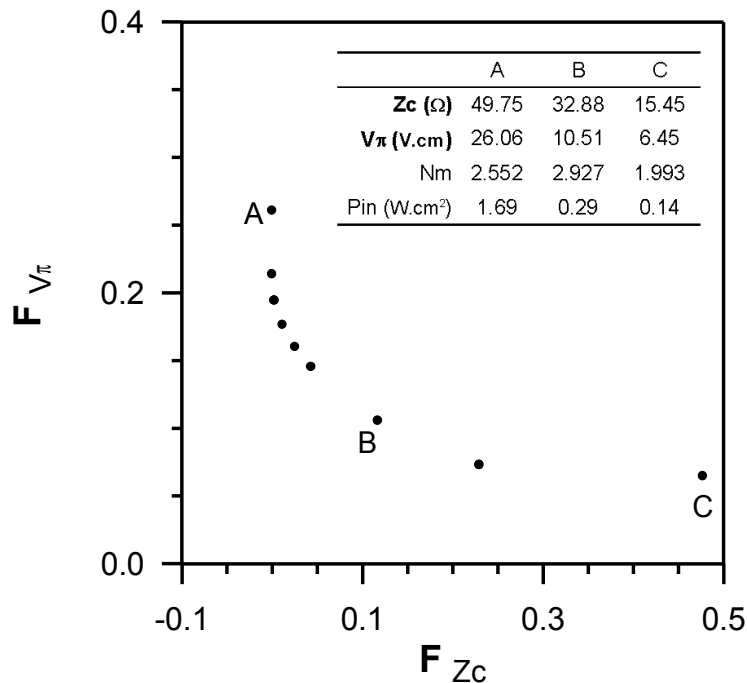


Figura 4.11 - Soluções Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e a tensão de meia-onda V_π , para um modulador MZ convencional.

Esta curva reproduz, de maneira explícita, o comportamento da otimização monoobjetivo discutida na literatura, evidenciando o comportamento antagônico destas duas características.

A convergência das soluções, para cada par de pesos, seguiu um comportamento similar àqueles obtidos na otimização monoobjetivo. Na Figura 4.12 é mostrado o perfil de convergência para o par de peso $w_1 = w_2 = 0,5$, onde se observa uma estabilização da solução a partir da 12ª geração, com a parada do processo na 15ª geração pelo critério de 51% da população possuir a mesma função objetivo.

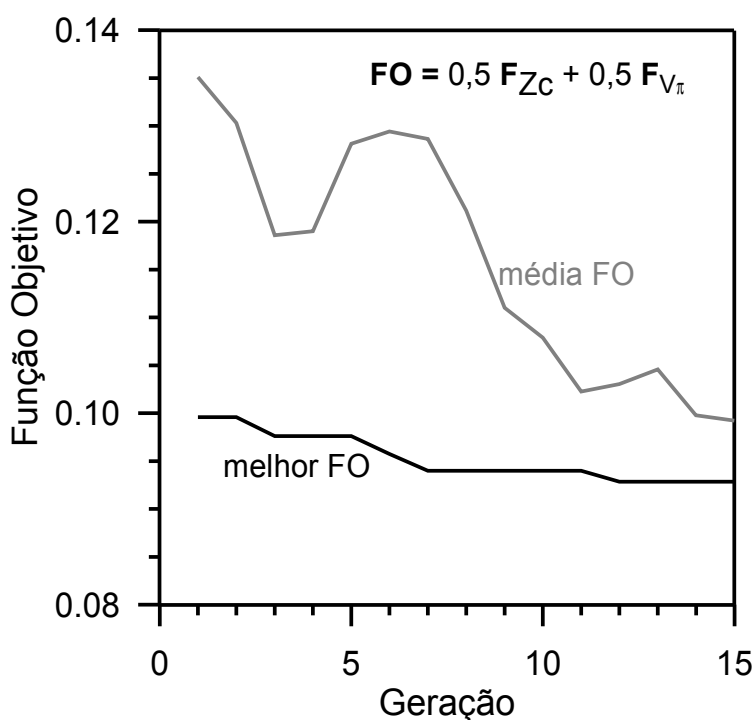


Figura 4.12 - Variação da função objetivo (média e melhor) como função do número de gerações, para otimização multiobjetivo, utilizando o método da soma ponderada.

Um segundo estudo com moduladores do tipo MZ convencional envolveu a otimização de Z_c e N_m (índice efetivo da onda eletromagnética) ao mesmo tempo. O valor ótimo buscado para N_m foi N_o (2,142). As soluções obtidas são apresentadas na Figura 4.13 e definem uma fronteira de Pareto aproximada. Estas soluções, Pareto-ótimo (identificadas com uma cruz) e quase-Pareto-ótimo, são viáveis, porém observa-se uma

ausência de soluções no intervalo $0,05 \leq F_{Z_c} \leq 0,3$. Conforme discutido anteriormente (seção 3.5.1), o método da soma ponderada não é adequado para problemas que apresentam regiões não convexas (concauidades). O comportamento nesta região pode ser evidenciado com a introdução do conjunto de soluções dominadas, pertencentes ao espaço de soluções do problema, conforme mostra a Figura 4.14.

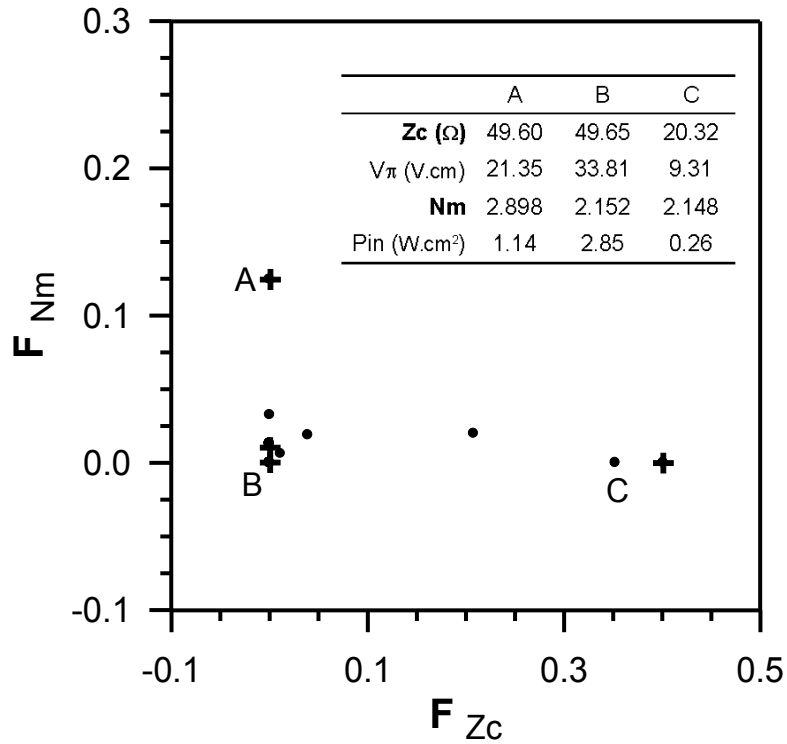


Figura 4.13 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ convencional.

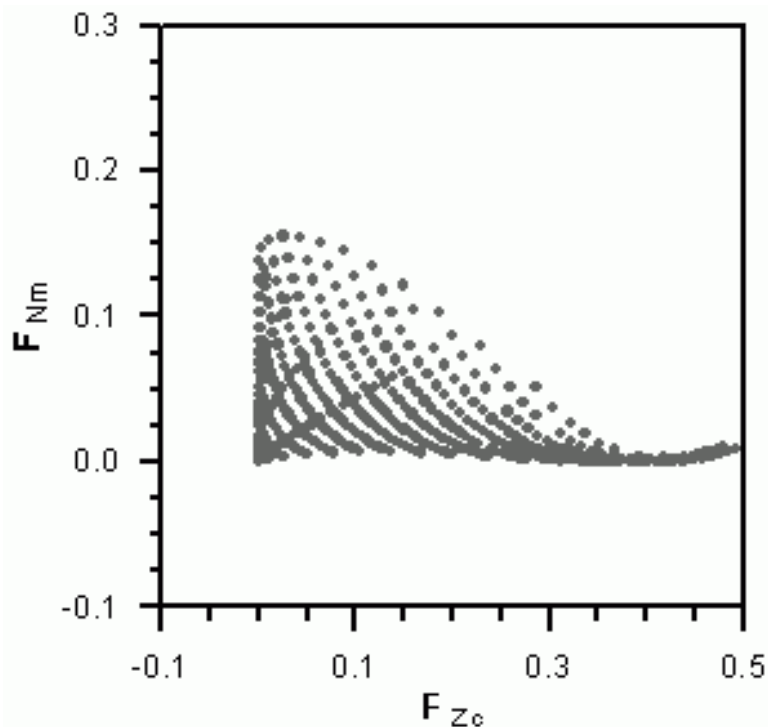


Figura 4.14 - Espaço de soluções, mostrando uma região não convexa no intervalo $0,05 \leq F_{Z_c} \leq 0,3$.

Com os dados da Figura 4.13 foi observado um comportamento do dispositivo que pode passar despercebido em um processo de otimização monoobjetivo, porém é um aspecto bastante interessante que pode ser utilizado em trabalhos futuros que tenham enfoque na operação dos moduladores eletroópticos. O ponto **C** possui um descasamento de impedância (devido a relação de pesos que favorece a otimização de N_m), porém as outras características apresentam valores desejáveis para um dispositivo de alto desempenho. O valor de N_m é bastante próximo de N_o (0,28%) resultando em uma alta largura de banda. O valor baixo de V_π contribui para que potência de trabalho do dispositivo (P_{in}) seja menor do que a potência com o dispositivo casado com a fonte (ponto **B**). De fato, considerando P_I a potência deste dispositivo e P_o a potência assumindo o perfeito casamento de impedância ($Z_s=Z_c=50\Omega$) a potência para esta configuração de dispositivo será:

$$P_1 = \left\{ 1 - \left(\frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \right)^2 \right\} P_0 \quad \text{ou} \quad P_1 = 0,82 P_0 \quad (4.4)$$

ou seja, esta configuração de dispositivo poderia operar com uma potência 18% menor do que o dispositivo casado. Obviamente, o descasamento de impedância implica em reflexão de potência para a fonte, retornando aproximadamente $0,05 \text{ W.cm}^2$ da potência de trabalho calculada, não levando em consideração as perdas nos eletrodos e no dielétrico. Porém, sendo uma potência de retorno baixa, a fonte pode assimilar isto, sem prejuízo para seu funcionamento.

O terceiro estudo de otimização de um modulador tipo MZ convencional considerou as características P_{in} e N_m . O valor buscado para P_{in} foi 0 Watts. Novamente, as soluções Pareto-ótimo (identificadas com uma cruz) e quase-Pareto-ótimo obtidas são viáveis, mas há também uma indicação de uma região não convexa no intervalo $0,5\text{E-}4 \leq P_{in} \leq 2,75\text{E-}4$, como mostrado na Figura 4.15. Observa-se que a fronteira apresenta uma planicidade entre os pontos **B** e **C**. Isto é devido aos intervalos das escalas adotadas para os eixos x e y , não significando que a variação de N_m é indiferente para P_{in} . Expandindo as escalas, nota-se que as grandezas guardam uma relação praticamente linear entre elas, ou seja, uma variação de 10% em N_m corresponde a uma variação similar em P_{in} .

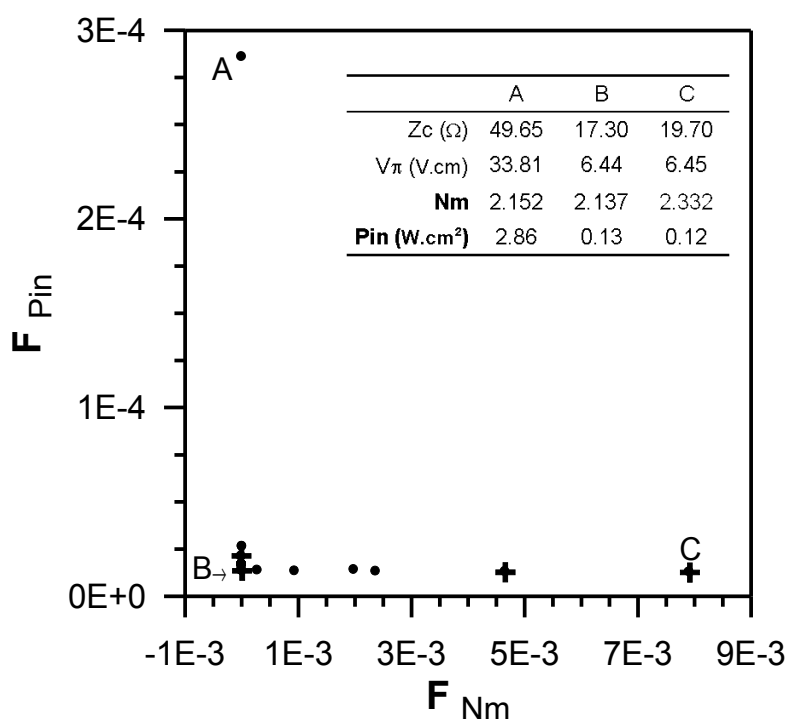


Figura 4.15 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a potência P_{in} e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ convencional.

Esta curva também apresenta resultados semelhantes aos discutidos na Figura 4.13, ou seja, os pontos **B** e **C** apresentam descasamento de impedância, mas possuem P_{in} bem abaixo do ponto **A** (condição de quase casamento de impedância). Ainda mais, o ponto **B** tem alta largura de banda, devido a N_m (0,26% de N_o). Com relação à potência, esta configuração requer 23% menos do que a configuração casada (Equação 4.4) e refletindo 0,03 W.cm² para a fonte.

As otimizações para os pares de características apresentadas anteriormente foram aplicadas a um modulador com estrutura de eletrodos flutuantes. A otimização das características Z_c e V_π com as soluções Pareto-ótimo é mostrada na Figura 4.16. Observa-se novamente o bom balanceamento das soluções. Como esperado, estes resultados foram melhores do que os obtidos com a estrutura convencional, com a fronteira de Pareto se aproximando mais do zero, para ambos os objetivos.

Na Figura 4.17 são apresentadas as soluções Pareto-ótimo (identificadas com uma cruz) e quase-Pareto-ótimo para a otimização de Z_c e N_m em moduladores de eletrodos flutuantes. A similaridade com a fronteira apresentada na Figura 4.13, sugere a existência de uma região não convexa no intervalo $0,1 \leq F_{Z_c} \leq 0,4$.

A fronteira com soluções Pareto-ótimo (identificadas com uma cruz) e quase-Pareto-ótimo para o terceiro par de característica, P_{in} e N_m , é apresentada na Figura 4.18. Novamente, evidencia-se uma região não convexa no intervalo $4,0E-5 \leq F_{P_{in}} \leq 7,0E-5$. Como esperado, a estrutura de eletrodos flutuantes possui um desempenho melhor do que a estrutura convencional, o que pode ser verificado comparando-se o ponto **B** das Figuras 4.15 e 4.18. O valor de N_m é praticamente igual, porém a potência é menor (60,5%) para o ponto **B** da última curva.

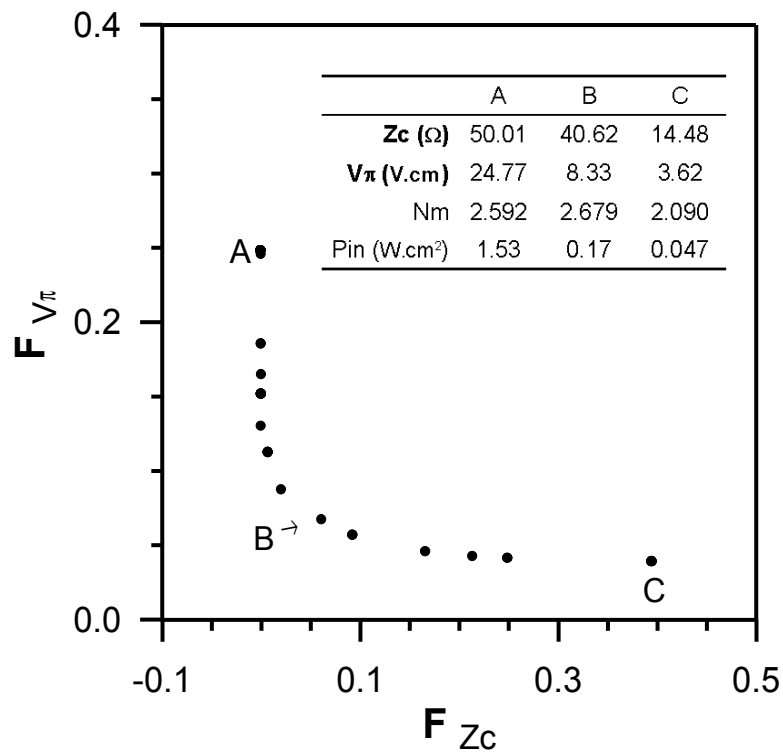


Figura 4.16 - Soluções Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e a tensão de meia-onda V_π , para um modulador MZ de eletrodos flutuantes.

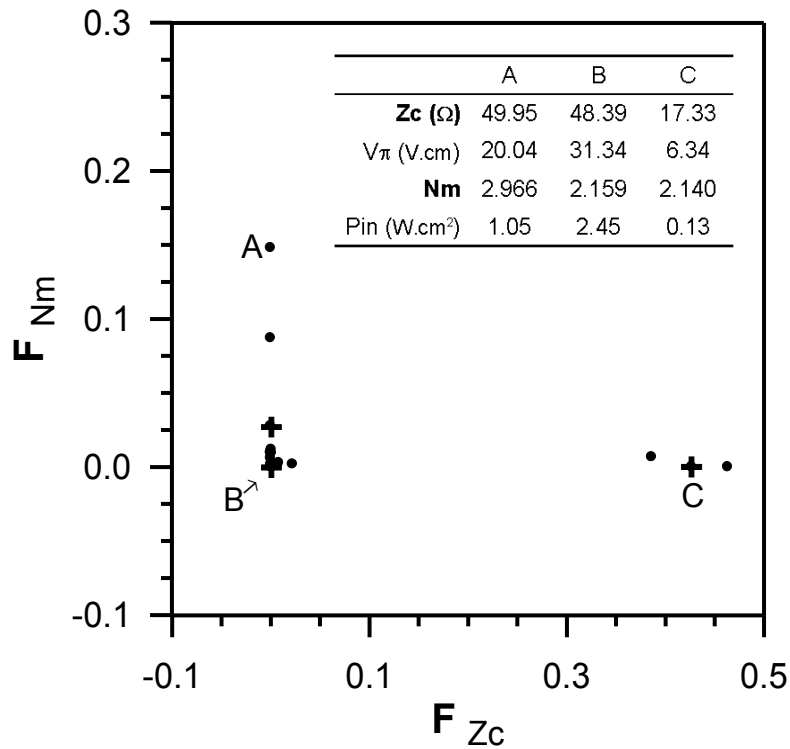


Figura 4.17 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a impedância característica Z_c e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ de eletrodos flutuantes.

A configuração deste dispositivo também reproduziu o comportamento encontrado no modulador tipo MZ convencional, com respeito ao descasamento de impedância, mas com baixa potência de operação. O ponto **B** da Figura 4.18 é um exemplo deste comportamento. N_m divergiu 0,187% de N_o , demonstrando uma melhora da largura de banda, com relação ao modulador tipo MZ convencional. A potência requerida para operação é 27% menor do que a configuração com casamento de impedância.

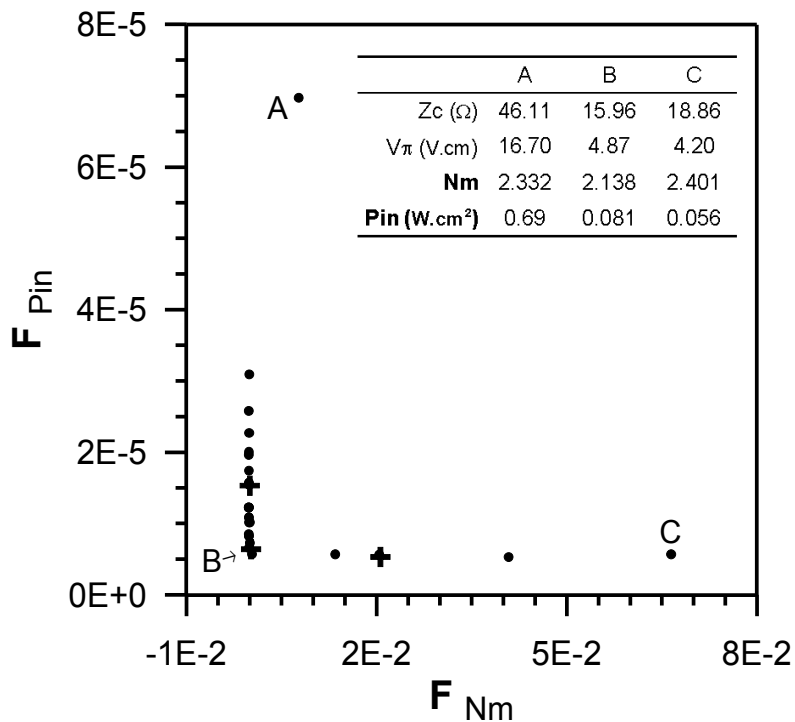


Figura 4.18 - Soluções Pareto-ótimo (marcadas com cruz) e quase-Pareto-ótimo para a potência P_{in} e o índice efetivo da microondas N_m , para um modulador MZ de eletrodos flutuantes.

A Tabelas 4.4 e 4.5 mostram os parâmetros geométricos obtidos para cada modulador denominado **A**, **B** e **C** nos estudos apresentados. A análise das tabelas permite identificar os mesmos aspectos conflitantes encontrados no processo de otimização monoobjetivo. Na Tabela 4.4, por exemplo, na otimização do par Z_c e V_π , se os pesos favorecem Z_c então a distância entre os eletrodos (G) é maior do que quando V_π é favorecido, conforme discutido na seção 5.2.

Tabela 4.4 - Parâmetros de um modulador MZ convencional, relativos aos pontos A, B e C das Figuras 4.11, 4.13 e 4.15.

otimização	ponto	G (μm)	Te (μm)	W_H (μm)
Z_c e V_π (Fig. 4.11)	A	31	14	10
	B	13	4	28
	C	5	19	36
Z_c e N_m (Fig. 4.13)	A	27	5	14
	B	35	29	6
	C	11	28	30
P_{in} e N_m (Fig. 4.15)	A	35	29	6
	B	5	14	36
	C	5	9	36

Tabela 4.5 - Parâmetros de um modulador MZ com eletrodos flutuantes, relativos aos pontos A, B e C das Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.

otimização	ponto	G (μm)	Te (μm)	W_H (μm)	g (μm)
Z_c e V_π (Fig. 4.16)	A	31	13	10	33
	B	31	5	10	7
	C	5	19	36	5
Z_c e N_m (Fig. 4.17)	A	27	4	14	29
	B	35	30	6	33
	C	7	21	34	13
P_{in} e N_m (Fig. 4.18)	A	35	18	6	13
	B	5	16	36	9
	C	9	18	32	5

A otimização multiobjetivo de moduladores eletroópticos, aplicando o método da soma ponderada, forneceu soluções interessantes para a construção destes dispositivos, permitindo identificar configurações factíveis que minimizam a potência de operação

mantendo uma grande largura de banda, mesmo com descasamento de impedância. O retorno de potência causado pelo descasamento pode ser facilmente absorvido pelas fontes comerciais. O resultado é inédito na literatura, evidenciando soluções que provêm um bom balanceamento de características conflitantes entre si.

Como o problema de otimização multiobjetivo na área de moduladores ainda não é totalmente conhecido, alguns pares de características geraram uma fronteira de Pareto aproximada, porém o espaço de soluções não foi mapeado adequadamente pelo método da soma ponderada, indicando a existência de concavidades ou descontinuidades neste espaço o que ilustra o cuidado necessário para a escolha do método de otimização. Contudo, mesmo aplicado a um problema cujo espaço de soluções não é conhecido, o método da soma ponderada forneceu uma indicação clara das regiões que exigem maior atenção.

4.4.2 Método das restrições (“ ϵ -constraint method”)

Alguns pares de características geraram uma fronteira de Pareto aproximada e a ausência de pontos em determinadas regiões da fronteira indicou a presença de concavidades ou descontinuidades, que não foi adequadamente tratada pelo método da soma ponderada. A fim de se conseguir um estudo mais detalhado nestas regiões, foi implementado o Método das Restrições.

A discussão sobre os resultados apresentados a seguir se baseiam no modulador MZ convencional. Esta argumentação também é válida para o caso dos moduladores MZ com eletrodos flutuantes, cujos resultados foram similares, de maneira que foi dispensada a apresentação dos gráficos para este tipo de modulador.

A primeira análise realizada foi uma comparação entre o método da soma ponderada e o método das restrições no estudo de uma curva convexa bem comportada, como no caso das características Z_c e V_π . A Figura 4.19 mostra que os dois métodos são eficientes na obtenção das soluções Pareto-ótimo. Em relação ao tempo computacional para a

obtenção dos dados, o método das restrições é mais custoso que o método da soma ponderada. Cada intervalo de ϵ corresponde a uma sub-região do espaço de busca, na qual deve ser realizado o processo de otimização. Com a diminuição do intervalo, melhora-se o mapeamento da fronteira de Pareto, mas por outro lado, aumenta-se o número de avaliações.

Para este tipo de fronteira (curva convexa), os dois métodos podem ser usados, pois geram fronteiras similares com uma boa distribuição de pontos.

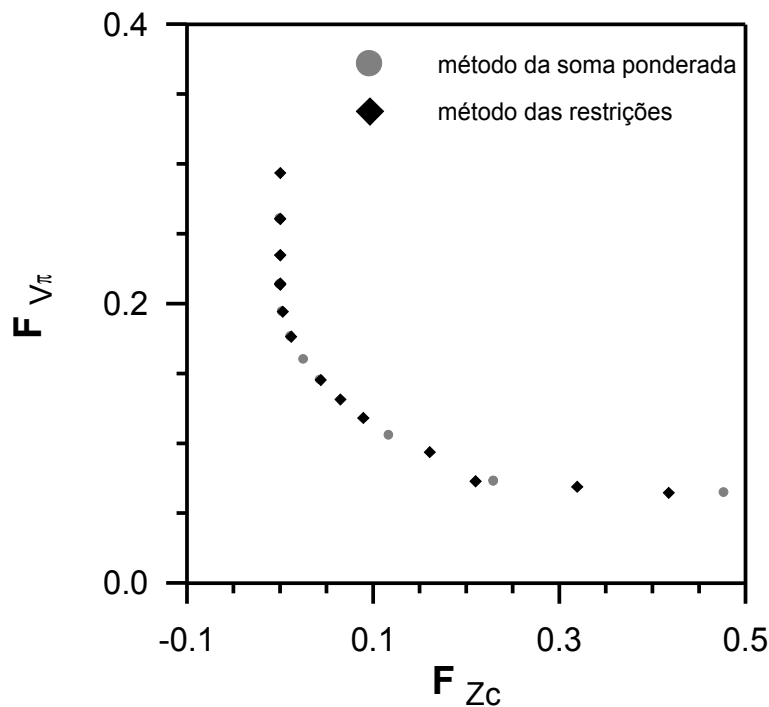


Figura 4.19 - Soluções Pareto-ótimo para Z_c e V_π , para um modulador MZ convencional. Comparação entre o método da soma ponderada e o método das restrições.

A Figura 4.20 mostra o resultado para obter soluções Pareto-ótimo ou quase-Pareto-ótimo com o par de características Z_c e N_m , no intervalo $0,05 \leq F_{Z_c} \leq 0,3$, utilizando N_m como restrição adicional. Pela aplicação do método, alguns pontos adicionais foram obtidos para esta região. Porém, a fronteira não teve um mapeamento adequado. É possível ver que a variação de F_{Z_c} produz uma variação de pequena amplitude em F_{N_m} , significando que devem ser utilizados passos muito pequenos de ϵ a

fim de conseguir achar soluções satisfatórias para o intervalo pesquisado. O estudo deste trabalho utilizou um passo de 10^{-3} para varrer este intervalo. Mesmo assim, o resultado foi um adensamento de pontos no início do eixo x (F_{Zc}). Estudos considerando passos menores não foram realizados e exigiriam um tempo computacional maior, mesmo considerando o processamento paralelo do processo de otimização.

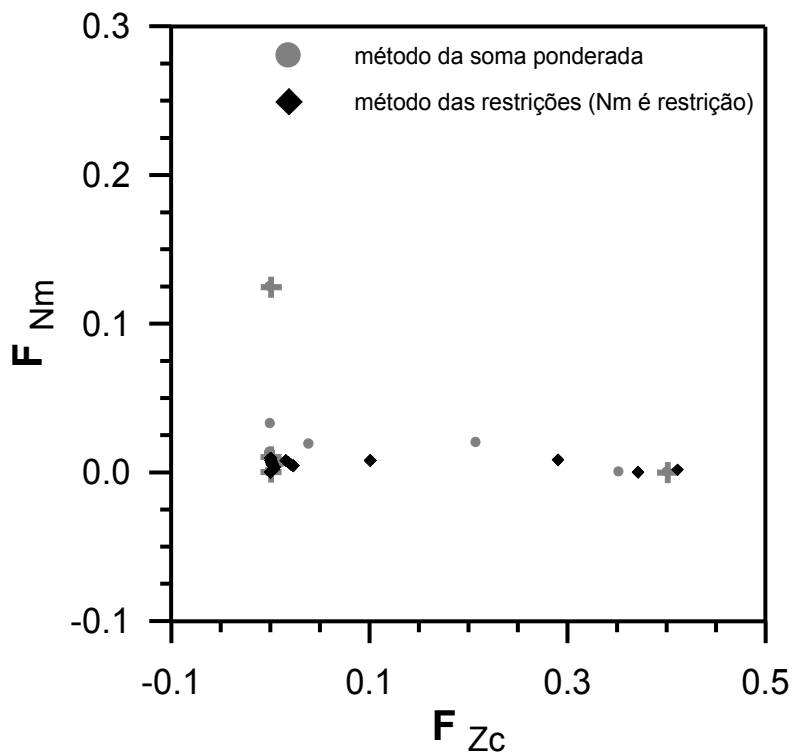


Figura 4.20 - Soluções Pareto-ótimo e quase-Pareto-ótimo para a Z_c e N_m , no intervalo $0,05 \leq F_{Zc} \leq 0,3$, para um modulador MZ convencional. Utilizado o método das restrições, com N_m transformado em restrição adicional.

Por outro lado, a inversão da função objetivo, utilizando F_{Nm} a ser otimizada e F_{Zc} como restrição, permitiu um melhor mapeamento desta região, conforme mostra a Figura 4.21.

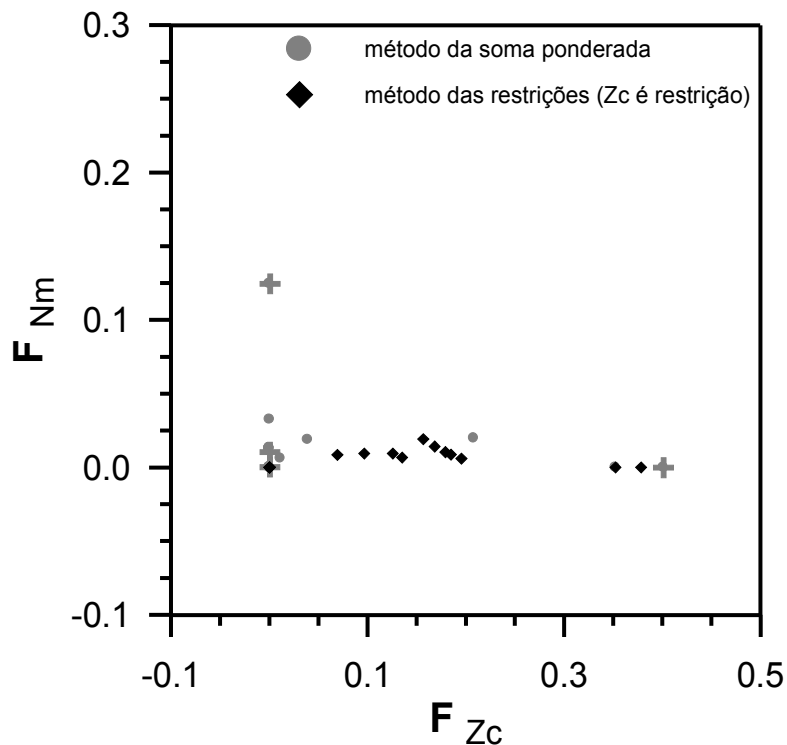


Figura 4.21 - Soluções Pareto-ótimo e quase-Pareto-ótimo para a Z_c e N_m , no intervalo $0,05 \leq F_{Z_c} \leq 0,3$, para um modulador MZ convencional. Utilizado o método das restrições, com Z_c transformado em restrição adicional.

Em princípio, o método das restrições pode substituir o método da soma ponderada para o processo de otimização, sem prejuízo da qualidade dos resultados, porém, devido à natureza complexa das fronteiras apresentadas nas Figuras 4.13, 4.15, 4.17 e 4.18, a primeira tentativa de se definir o intervalo e o passo para ϵ não é um processo trivial. Sem um conhecimento prévio do perfil da fronteira e dos limites das funções objetivo, o processo de otimização pode gerar soluções parciais ou impossibilitar a obtenção de um conjunto de pontos que sejam adequados para a construção da fronteira de Pareto.

4.4.3 Método da soma ponderada aplicado à otimização de três características

Embora a otimização multiobjetivo para pares de características de um modulador MZ tenha conseguido analisar e identificar comportamentos deste dispositivo que não são facilmente observados na otimização monoobjetivo e não são descritos na literatura, um

tratamento posterior dos resultados é necessário, a fim de que “pontos” desejáveis de operação do dispositivo sejam escolhidos, quer analisando individualmente as soluções Pareto-ótimo obtidas, quer inter-relacionando várias curvas de soluções Pareto-ótimo.

Uma maneira para diminuir o número de análises posteriores é tentar agrupar o maior número de funções objetivo que serão resolvidas ao mesmo tempo no processo de otimização multiobjetivo, concentrando as informações. Para isto, o método da soma ponderada foi aplicado na otimização de três características: Z_c , N_m e V_π para um modulador MZ convencional.

A Figura 4.22 mostra o resultado para esta otimização, na qual as soluções Pareto-ótimo foram colocadas em um gráfico em forma de curvas de nível, sendo F_{N_m} a elevação. O comportamento deste gráfico segue o mesmo perfil dos gráficos gerados nas otimizações de pares de características. A área **C** representa pontos que permitem uma comparação com o comportamento analisado nas Figuras 4.15 e 4.18 em que, apesar do descasamento de impedância, apresentam uma alta largura de banda, baixo V_π e conseqüentemente baixa P_{in} . A área **A** mostra o favorecimento de Z_c , com degradação de V_π . A área **B** proporciona bons valores para Z_c , e V_π , mas é ruim para N_m com uma divergência de 10% do valor de N_o .

A Figura 4.23 mostra este mesmo resultado da otimização em um gráfico de superfície que segue o mesmo padrão das curvas de nível. Aqui, a superfície apresentada é feita por meio de interpolação, gerada pelo programa gráfico, dos pontos obtidos da fronteira de Pareto, porém fornece uma idéia do comportamento ou inter-relação entre as características. Na Tabela 4.6 são mostrados os valores referentes aos pontos **A**, **B** e **C**.

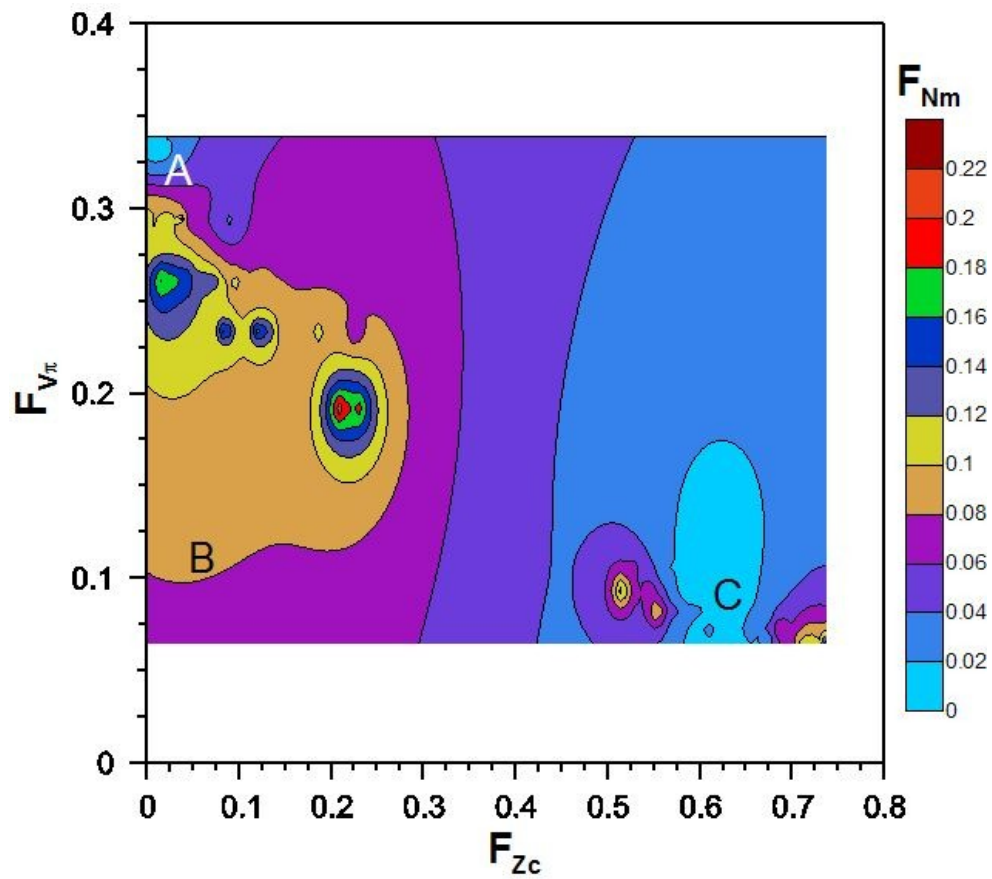


Figura 4.22 - Soluções Pareto-ótimo para Z_c , N_m e V_π , para um modulador MZ convencional. Gráfico de curvas de nível, onde F_{Nm} representa a elevação.

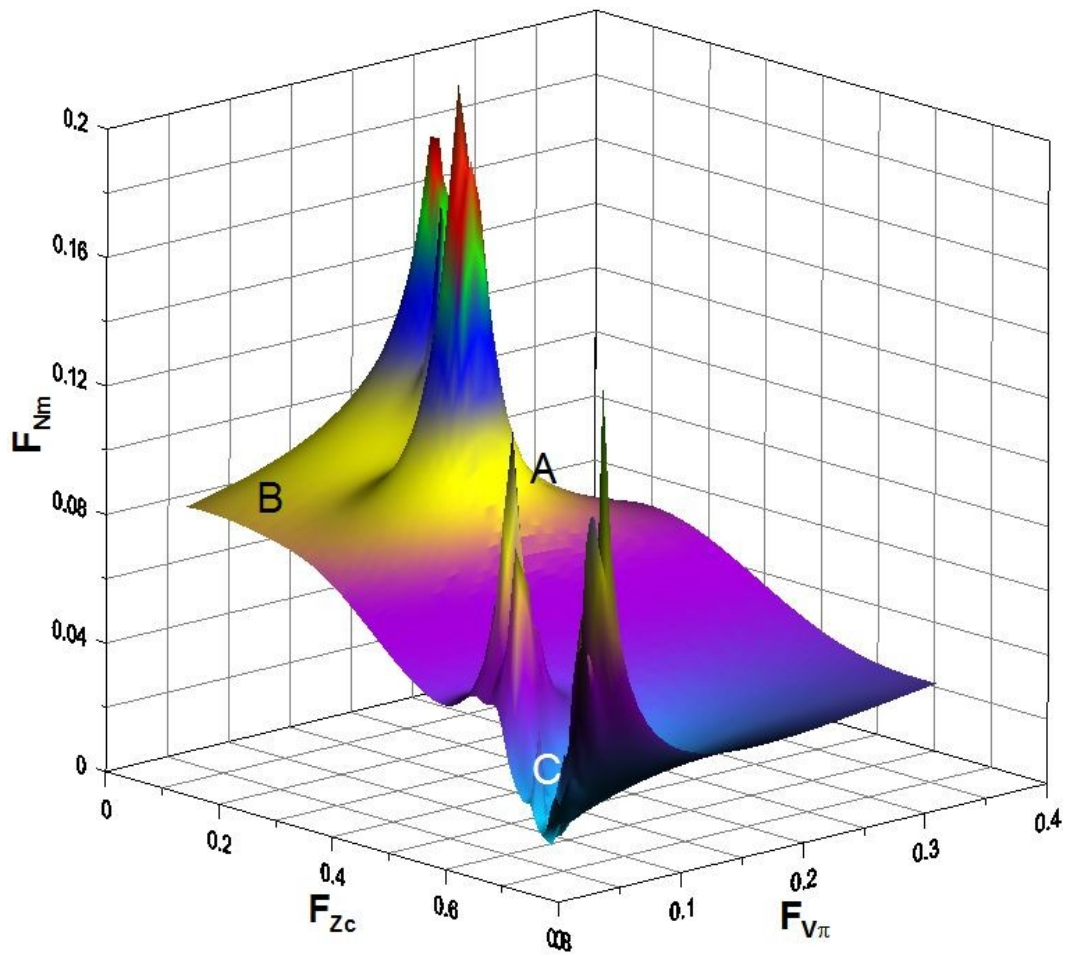


Figura 4.23 - Curva de superfície das soluções Pareto-ótimo para as características Z_c , N_m e V_{π} , de um modulador MZ convencional.

Tabela 4.6 - Parâmetros e características de um modulador MZ convencional, relativos aos pontos A, B e C da Figura 4.22.

otimização	ponto	G (μm)	T_e (μm)	W_H (μm)	Z_c (Ω)	V_{π} (V.cm)	N_m	P_{in} (W.cm ²)
Z_c , V_{π} e N_m (Fig. 4.22)	A	35	28	6	50,16	33,82	2,166	2,85
	B	33	24	8	47,85	29,35	2,299	2,15
	C	9	24	32	19,24	8,21	2,143	0,21
	Valor ótimo				50	0	2,142	0

4.5 Análise de resultados com descasamento de impedância

Os resultados obtidos com a análise multiobjetivo são discutidos nesta seção com mais detalhes pois, sendo esta uma das primeiras implementações multiobjetivo para aplicações em moduladores eletroópticos, soluções Pareto-ótimo forneceram configurações com características de funcionamento de interesse tecnológico.

Otimizações monoobjetivo buscam por configurações ótimas para os moduladores que atendam requisitos de casamento de impedância, ou casamento de velocidade de propagação (grande largura de banda) ou menor tensão de meia-onda (baixa potência de operação). Devido à natureza conflitante destas características, raramente todos os requisitos serão atendidos em uma dada configuração. Por outro lado, otimizações multiobjetivo fornecem conjuntos de soluções que proveem um balanceamento entre as diversas características a serem otimizadas, como visto na Figura 4.11. Naquela curva já se evidenciam configurações como a representada pelo ponto **C**, a qual possui a melhor velocidade de propagação, a mais baixa tensão de meia-onda e a menor potência de operação, mesmo levando em conta o descasamento de impedância que resulta na reflexão do sinal modulante para a fonte. Ressalta-se que a potência de retorno não causaria problemas no funcionamento da fonte, por ser muito baixa, da ordem de centenas de miliwatts. Por outro lado, o descasamento de impedância pode ocasionar reflexões múltiplas da onda eletromagnética, o que impactaria na degradação da largura de banda. Este comportamento deve ser avaliado, sendo um dos trabalhos futuros a ser desenvolvido na continuação deste trabalho.

A Figura 4.13 também permite obter dispositivos com estas características inusitadas, conforme mostra o ponto **C**, com uma maior largura de banda, comparado ao mesmo ponto da Figura 4.11.

A Figura 4.15 apresenta dois pontos (**B** e **C**) com características similares, diferindo

apenas no índice efetivo para microondas. Novamente, a obtenção de configurações de baixa potência de operação com descasamento de impedância é evidenciada. Nota-se que para este par de características otimizadas são obtidas várias configurações de baixa potência de operação.

As curvas das Figuras 4.16 a 4.18 referem-se às otimizações para o modulador com eletrodos flutuantes e, como esperado, são obtidas configurações com melhor desempenho do que o do modulador tipo MZ convencional. Nessas curvas é possível evidenciar configurações com as características comentadas anteriormente e com menores potências de operação. Isto é devido aos menores valores de tensão de meia-onda obtidos, pois a potência de operação depende do quadrado da tensão de meia-onda. Observa-se também que os valores da impedância característica são similares aos do modulador tipo MZ convencional, não impondo desta forma, maior retorno de potência para a fonte.

Dentre os pontos apresentados nas figuras, destaca-se o ponto **B** da Figura 4.18 com um dos melhores balanceamentos entre as três características (tensão de meia-onda, índice efetivo para microondas e potência de operação). Mesmo considerando o descasamento de impedância, a potência de retorno é muito baixa devido ao baixíssimo consumo requerido por esta configuração.

Com relação à qualidade da otimização, comparando-se as otimizações para moduladores flutuantes com o melhor resultado conseguido em Franco et al. (1999b):

$$Z_c = 46,2 \Omega \quad V_{\pi} L = 8,2 V.cm \quad N_m = 2.36 \quad P_{in} L = 0,168 W.cm^2$$

observa-se que os valores acima estão próximos aos valores das características obtidos para o ponto **B** da Figura 4.16. Pesquisando outros pontos na fronteira de Pareto, é possível obter conjuntos de valores que se aproximem mais do resultado de Franco et al. (1999b) porém, deve-se ressaltar o fato que neste trabalho não foram apresentados os parâmetros e características de cada um dos pontos presentes na fronteira de Pareto.

A otimização para três características (Figuras 4.22 e 4.23) também evidenciou configurações com baixo consumo de potência, considerando o descasamento de impedância. Observam-se valores similares de características para o ponto C das Figuras 4.13 e 4.22.

Os trabalhos publicados nesta área costumam otimizar apenas uma das características ou buscam a otimização de mais de uma característica, porém em cascata. Analisando em retrospecto, fica claro que a potência é dependente de um balanço entre o valor da tensão de meia-onda e o descasamento de impedância, contudo, em todos os experimentos efetuados, durante a execução deste trabalho, com otimização monoobjetivo, mesmo impondo restrições em outras características, não se conseguiu obter soluções com o balanceamento apresentado pela otimização multiobjetivo.

A otimização multiobjetivo é, portanto, uma ferramenta importante para evidenciar estas configurações pouco exploradas na literatura. Pesquisas posteriores incluindo novos parâmetros deverão permitir análises mais detalhadas destes dispositivos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos princípios fundamentais em nosso mundo é a busca por um estado ótimo. Desde os primórdios da humanidade, esforços são realizados em várias áreas para se alcançar a perfeição. Deste modo, o processo de otimização é uma das mais antigas ciências que se estendem até os dias atuais. As publicações sobre otimização na literatura e congressos têm crescido não só em número, mas também na diversidade das áreas de aplicação. Atualmente é possível encontrar métodos de otimização sendo utilizados em computação, engenharias, física, química, biologia, economia, etc. O interesse pelas otimizações numéricas se deve, em parte, à exigência por produtos de qualidade a preços competitivos, aliada à busca de elevado desempenho computacional em máquinas de baixo custo.

Estes incentivos contribuíram para a realização deste trabalho, o qual apresentou uma implementação computacional para um processo de otimização multiobjetivo aplicado ao projeto ótimo de moduladores eletroópticos. O processo de otimização utilizou um algoritmo genético para a solução do problema inverso e o método dos elementos finitos para o problema direto.

Com este trabalho, apresenta-se um novo enfoque na área de moduladores otimizando, simultaneamente, características que normalmente são otimizadas independentemente e, em geral, na base de tentativas e erros. Esta implementação multiobjetivo permitiu a identificação de geometrias de moduladores de potencial interesse tecnológico.

5.1 Contribuições

Moduladores eletroópticos do tipo Mach-Zehnder são componentes de óptica integrada fundamentais para a comunicação em banda larga e para sistemas de sensoriamento baseado em tecnologia óptica. Vários são os trabalhos publicados que buscam configurações ótimas desses moduladores, ora buscando dispositivos que atendam requisitos de grande largura de banda, ora dispositivos com baixíssimo consumo de

energia. Normalmente, esses dois requisitos não são atendidos simultaneamente. A questão principal é que para se obter uma grande largura de banda deve-se garantir um casamento entre as velocidades de propagação da onda óptica no guia difuso e da onda eletromagnética, guiada pelos eletrodos. Esse casamento resulta em valores de impedância característica do dispositivo muito diferentes da impedância de saída de fontes de microondas comerciais, o que resulta na reflexão de microondas para a fonte, reduzindo a potência de microondas efetivamente utilizada para modulação no dispositivo.

A avaliação da potência necessária para modulação é dependente tanto das impedâncias da fonte e do dispositivo como do valor da tensão de meia-onda, a qual está relacionada com a sobreposição dos campos óptico e o elétrico. Análises ou otimizações, individuais, destas características resultam sempre em configurações de moduladores que sacrificam seriamente uma ou mais características.

Neste contexto, o trabalho apresentado buscou aplicar duas técnicas de otimização multiobjetivo para o estudo desse tipo de dispositivo. A primeira técnica, o método da soma ponderada, permitiu identificar a existência de regiões não convexas nas curvas de otimização multiobjetivo. Além disso, foi possível identificar configurações de moduladores que podem operar com baixa potência de entrada e que apresentam grande largura de banda. A baixa potência de operação requerida foi obtida mesmo com um grande descasamento da impedância em relação a fontes de microondas comerciais. A potência refletida é pequena, da ordem de centenas de miliwatts, não proporcionando danos à fonte. Um dispositivo com estas características é de interesse tecnológico. Deve-se no entanto, ressaltar que a partir deste trabalho será possível uma análise mais detalhada dos dispositivos, com a inclusão de novos parâmetros que aumentarão em muito o espaço de busca. Também deverão ser consideradas características adicionais ou restrições, tais como a avaliação de perdas nos condutores e talvez até nos dielétricos que compõem o modulador.

A evidência de regiões não convexas nas curvas de otimização, exigiu a aplicação de

um segundo método, o método de restrições, que permitiu uma melhor definição das regiões não convexas. Como este método é muito mais custoso computacionalmente para definir a fronteira de Pareto, fica evidente a necessidade do uso conjunto desses dois métodos na otimização de estruturas ainda mais complexas, que incluam a possibilidade de modificações também na forma geométrica do substrato, como no caso do modulador “back-slot”.

A implementação, robusta e versátil, do mecanismo de otimização permite a otimização de outras variações de moduladores (diferentes geometrias, materiais, corte do cristal, por exemplo), trocando-se o modelo em estudo e ajustando-se algumas variáveis de um arquivo de entrada.

O problema inverso e o problema direto podem ser executadas de forma seqüencial, em um único computador, ou em um ambiente paralelo de memória distribuída, composto por um conjunto de computadores com características idênticas ou não. A implementação foi desenvolvida de forma a ser multiplataforma, ou seja, pode ser executado tanto em sistema operacional Win32, como em Linux, desde que compilação adequada seja feita. Em princípio não há obstáculos para que o processo seja executado em sistemas operacionais de 64 bits, porém não foram realizados testes.

Contribuições secundárias foram geradas, como o estudo de esquemas de comunicação em implementações paralelas, aplicados em métodos iterativos para resoluções de sistemas de equações lineares e a inclusão do tratamento de materiais anisotrópicos ao conjunto de bibliotecas matemáticas SDK-LEVSOFT.

5.2 Trabalhos futuros

O estudo com o Algoritmo Genético comprovou ser robusto suficiente para achar as soluções Pareto-ótimo, mas implementações de outros métodos estocásticos serão analisadas como por exemplo a Otimização por Colônias de Formigas (DOERNER et al., 2004; DORIGO et al., 1996) e Bando de Pássaros (YANG e SIMON, 2005),

objetivando o desenvolvimento de um “framework” para problemas de otimização. Com isto pretende-se concentrar em um único programa, vários algoritmos de otimização para a resolução de problemas de dispositivos eletromagnéticos, de maneira que algum usuário tenha opção de escolha, de maneira amigável, do algoritmo de busca mais adequado ao seu problema, inclusive com possibilidade de combinação destes métodos.

Outros métodos para obtenção das soluções Pareto-ótimo serão investigados, de forma a tratar melhor problemas que geram fronteira de Pareto com regiões não convexas.

Outros parâmetros podem ser incluídos no processo de otimização, de forma a reproduzir melhor o dispositivo estudado. A inclusão dos aspectos construtivos do campo óptico, bem como a variação da posição deste, em relação aos eletrodos, seriam alguns desses parâmetros. Como comentado na seção 4.2.2, a posição do guia óptico tem influência principalmente na tensão de meia-onda. Da mesma forma, os parâmetros construtivos modificam o diâmetro do canal óptico, com isso melhorando ou piorando a interação entre os dois campos.

A inclusão dos parâmetros do campo óptico implica em modificações nos cálculos do modelo direto, com a geração de duas malhas distintas de elementos finitos: uma para o campo óptico e outra para campo elétrico e a implementação de um método de interconexão destas malhas, respeitando os limites geométricos do modelo em estudo.

A implementação multiobjetivo desenvolvida neste trabalho foi utilizada para validar a primeira fase de desenvolvimento de um sistema de gerenciamento robusto para um conjunto de micro-computadores com configurações heterogêneas, um sistema desenvolvido em Java e utilizando a tecnologia RMI (“Remote Method Invocation” - Invocação de Métodos Remotos), em substituição à biblioteca MPICH. A primeira versão desse sistema somente foi concluída muito recentemente (MARINS, 2007).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, N. M.; PASSARO, A.; FRANCO, M. A. R.; SIRCILLI NETO, F.; SERRÃO, V. A.; ODAN, D. H.; SANTOS, F. J.R. Um sistema de software para análise de dispositivos e componentes de óptica integrada, fibras ópticas e microondas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO (CBMag), 5, 2002, Gramado, Brasil. **Anais...** Gramado: [s.n], 2002. CD-ROM.

ABE, N. M.; FRANCO, M. A. R.; PASSARO, A. Analysis of an x-cut Ti:LiNbO_3 electrooptic modulator with a ridge structure. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC' 99), 1999, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** [S.l]: IEEE, 1999. v. 1, p. 126-130.

ALFENESS, R. C. Waveguide electrooptic modulators. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. MIT-30, n. 8, p. 1121-1137, 1982.

ANDERSSON, J. **A Survey of multiobjective optimization in engineering design**. Linköping: Linköping University, Department of Mechanical Engineering, 2000. Technical report LiTH-IKP-R-1097.

ANTONIOU A.; LU, W-S. **Practical optimization: algorithms and engineering applications**. New York: Springer Science+Business Media LLC., 2007. 669p.

ANWAR, N.; OBAYYA, S. S. A.; HAXHA, S.; THERMISTOS, C.; RAHMAN, B. M. A.; GRATTAN, K. T. V. The effect of fabrication parameters on a ridge Mach-Zehnder interferometric (MZI) modulator. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 5, p. 854-861, 2002.

AOKI, K.; KONDO, J.; KONDO, A.; MORI, T.; MIZUNO, Y.; SHIMODAIRA, S.; IMAEDA, M.; KOZUKA, Y.; MITOMI, O.; MINAKATA, M. High-performance optical modulator with a wide center electrode and thin x-cut LiNbO_3 substrate. **IEEE Photonics Techn. Letters**, v. 16, n. 12, p. 2610-2612, 2004.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY (ANL). **MPICH-a portable implementation of MPI**, 2006. Disponível em <<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/index.htm>>. Acesso em: abr 2007.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys**, v. 35, n. 3, p. 268-308, 2003.

CANOVA, A.; GRUOSSO, G.; REPETTO, M. Magnetic design optimization and objective function approximation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 39, n. 5, p. 2154-2162, 2003.

CHANG, S.-J.; TSAI, C.-L.; LIN, Y.-B.; LIU, J.-F.; WANG, W.-S. Improved modulator with ridge structure in x-cut LiNbO₃. **Journal of Lightwave Technology**, v. 17, n. 5, p. 843-847, 1999.

CHUNG, H.; CHANG, W. S. C.; BETTS, G. E. Microwave properties of traveling-wave electrode in LiNbO₃ electrooptic modulators. **Journal of Lightwave Technology**, v. 11, n. 8, p. 1274-1278, 1993.

CHUNG, H.; CHANG, W. S. C.; ADLER, E. L. Modeling and optimization of traveling-wave LiNbO₃ interferometric modulators. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 27, n. 3, p. 608-616, 1991.

COELLO, C. A. C.; BECERRA, R. L. Evolutionary multiobjective optimization using a cultural algorithm. In: IEEE SWARM INTELLIGENCE SYMPOSIUM (SIS '03), 2003, Indianapolis, USA. **Proceedings...** [S.l]: IEEE, 2003. p. 6-13.

COELLO, C. A. C. An Updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. **ACM Computing Surveys**, v. 32, n. 2, p. 109-143, 2000.

COELLO, C. A. C. An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques: State of the Art and Future Trends. In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY

COMPUTATION (CEC 99), 1999, Washington, DC, USA. **Proceedings...** [S.1]: IEEE, 1999. v. 1, p. 6-9.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. England: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 515p.

DOERNER, K.; GUTJAHR, W. J.; HARTL, R. F.; STRAUSS, C.; STUMMER, C. Pareto ant colony optimization: a metaheuristic approach to multiobjective portfolio selection. **Annals of Operations Research**, v. 131, p. 79-99, 2004.

DONNELLY, J. P.; LAU, S. D. Generalized effective index series solution analysis of waveguide structures with positionally varying refractive index profiles. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 32, n. 6, p. 1070-1079, 1996.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B**, v. 26, n. 1, p. 29-41, 1996.

FENG, N. N.; ZHOU, G. R.; FANG, D. G.; HUANG, W. P.; XU, C. L. Analysis of the half-wave voltage and modulation bandwidth of electro-optical modulator considering the effect of conductor loss. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS AND ITS APPLICATIONS (ICCEA '99), 1999, Beijing, China. **Proceedings...** [S.1]: IEEE, 1999. p. 325-355.

FOUSKAKIS, D.; DRAPER, D. **Stochastic optimization**: a review, p. 1-35, 2001
Disponível em: <<http://www.soe.ucsc.edu/~draper>>. Acesso em: jan 2007.

FRANCO, M. A. R.; PASSARO, A.; CARDOSO, J. R.; MACHADO, J. M. Finite element analysis of anisotropic optical waveguide with arbitrary index profile. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, n. 3, p. 1546-1549, 1999a.

FRANCO, M. A. R.; PASSARO, A.; ABE, N. M.; MACHADO, J. M.; CARDOSO, J.

R. A design study of a Ti:LiNbO₃ traveling-wave electrooptic modulator by the finite element method. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC' 99), 1999b, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** [S.l]: IEEE, 1999. v. 1, p. 68-72.

FRANCO, M. A. R. **Análise de guias de ondas ópticos e de microondas pelo método dos elementos finitos**. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia de Eletricidade) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999c.

FRANCO, M. A. R.; PASSARO, A.; MACHADO, J. M. Mathematica notebook for computing tetrahedral finite element shape functions and matrices for the Helmholtz equation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, n. 5, p. 3387-3390, 1998a.

FRANCO, M. A. R.; PASSARO, A.; SIRCILLI NETO, F.; CARDOSO, J. R.; MACHADO, J. M. Modal analysis of diffused anisotropic channel waveguides by a scalar finite element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, n. 5, p. 2783-2786, 1998b.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Comput. Oper. Res.**, n. 13, p. 533-549, 1986.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical genetic algorithms**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004, 253p.

HAXHA, S.; RAHMAN, B. M. A. Bandwidth calculation of high-speed optical modulators. In: IEEE HIGH FREQUENCY POSTGRADUATE STUDENT COLLOQUIUM, 2002, London, England. **Proceedings...** [S.l]: IEEE, 2002. 8 p.

HO, S. L. YANG. S.; GUANGZHENG, N.; MACHADO, J. M. A modified ant colony optimization algorithm modeled on tabu-search methods. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 42, n. 4, p. 1195-1198, 2006.

HO, S. L.; YANG, S.; WONG, H. C.; CHENG, K. W. E.; NI, G. An improved ant colony optimization algorithm and its application to electromagnetic devices designs. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 41, n. 5, p. 1764-1767, 2005.

HO, S. L.; YANG, S.; WONG, H. C.; GUANGZHENG, N. A simulated annealing algorithm for multiobjective optimizations of electromagnetic devices. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 39, n. 3, p. 1285-1288, 2003.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.

HOPFER, S.; SHANI, Y.; NIR D. A novel, wideband, lithium niobate electrooptic modulator. **Journal of Lightwave Technology**, v. 16, n. 1, p. 73-77, 1998.

HOWERTON, M. M.; MOELLE, R. P.; GREENBLATT, A. S.; KRÄHENBÜHL, R. Fully packaged, broad-band LiNbO₃ modulator with low drive voltage. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 7, p. 792-794, 2000.

JONES, D. F.; MIRRAZAVI, S. K.; TAMIZ, M. Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. **European Journal of Operational Research**, v. 137, n. 1, p. 1-9, 2002.

KATSRIKU, F. A.; RAHMAN, B. M. A.; GRATTAN, K. T. V. Finite element analysis of diffused anisotropic optical waveguides. **Journal of Lightwave Technology**, v. 14, n. 5, p. 780-786, 1996.

KIRKPATRICK, S.; GELATT JR., C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

KONDO, J.; KONDO, A.; AOKI, K.; TAKATSUJI, S.; MITOMI, O.; IMAEDA, M.; KOZUKA, Y.; MINAKATA, M. Low-drive-voltage 40 GB/s modulator on x-cut LiNbO₃ wafer. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATION,

27, 2001, Amsterdam, The Netherlands. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2001. p. 334-335.

KONDO, J.; KONDO, A.; AOKI, K.; TAKATSUJI, S.; MITOMI, O.; IMAEDA, M.; KOZUKA, Y.; MINAKATA, M. High-speed and low-driving-voltage x-cut LiNbO₃ optical modulator with two step backside slot. **Electronics Letters**, v. 38, n. 10, p. 472, 2002a.

KONDO, J. KONDO, A.; AOKI, K.; IMAEDA, M.; MORI, T.; MIZUNO, Y.; TAKATSUJI, S.; KOZUKA, Y.; MITOMI, O.; MINAKATA, M. 40-Gb/s x-cut LiNbO₃ optical modulator with two-step back-slot structure. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 20, p. 2110-2114, 2002b.

LEBENSZTAJN, L.; COULOMB, J.-L. TEAM Workshop problem 25: a multiobjective analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 1402-1405, 2004a.

LEBENSZTAJN, L.; MARRETTO, C. A. R.; COSTA, M. C.; COULOMB, J.-L. Kriging: A useful tool for electromagnetic device optimization. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 1196-11199, 2004b.

LI, G. L.; YU, P. K. L. Optical intensity modulators for digital and analog applications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 21, n. 9, p. 2010-2030, 2003.

LIFANTE, G. Introduction to integrated photonics. In: _____. **Integrated photonics: fundamentals**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003. p. 1-22.

LIPSON, M. Compact electro-optic modulators on a silicon chip. **IEEE J. Select Topics in Quantum Electronics**, v. 12, n. 6, p. 1520-1526, 2006.

LIU Z.; YU, J.; ZHU, D. Design of a new type of electro-optic polymer waveguide modulator with ultrahigh bandwidth. **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, v. 27, n. 5, p. 707-724, 2006.

LU, H.; YEN, G. G. Multiobjective optimization design via genetic algorithm. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 2001, Mexico-city, Mexico. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2001. p. 1190-1195.

MARINS, C. D. **Proposta de um sistema robusto para gerenciamento de processamento distribuído em ambientes heterogêneos**. 2007. 98 p. Trabalho de Graduação Interdisciplinar - Universidade Braz Cubas, Mogi das Cruzes, 2007.

MINAKATA, M. Recent progress of 40-GHz-high-speed LiNbO₃ optical modulator. In: ACTIVE AND PASSIVE OPTICAL COMPONENTS FOR WDM COMMUNICATION (SPIE SYMPOSIUM), 2001, Denver, USA. **Proceedings...** [S.l.: s.n], 2001. v. 4532, p. 16-27.

MURARO, A. JR.; PASSARO, A.; PRETO, A. J.; STEPHANY, S. Design optimization of lithium niobate modulators using a genetic algorithm. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 27, 2006, Belém, Brasil. **Proceedings...** [S.l: s.n], 2006. CD-ROM.

MURARO, A. JR.; PASSARO, A.; PRETO, A. J.; STEPHANY, S. Inverse design of lithium niobate modulators using a genetic algorithm. In: WORLD CONGRESS ON STRUCTURAL AND MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION, 6, 2005, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** Rio de Janeiro: [s.n], 2005. ref. 3461. CD-ROM.

MURARO, A. JR.; PASSARO, A.; LIMA, O. F.; ABE, N. M.; TANAKA, R. Y. Implementação paralela do método dos gradientes conjugados para solução de sistemas esparsos de equações lineares. In: WORKSHOP DOS CURSOS DE COMPUTAÇÃO APLICADA DO INPE, 4, 2004, São José dos Campos, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2004.

NAKADA, M.; TSUDA, H.; OHASHI, K.; AKEDO, J. Aerosol deposition on transparent electro-optic films for optical modulators. **IEICE Transactions on Electronics**, v. E90-C, n. 1, p. 36-40, 2007.

NEITTAANMÄKI, P.; RUDNICKI, M.; SAVINI, A. **Inverse problems and optimal design in electricity and magnetism**. New York: Oxford University Press, Inc., 1996. 367p.

NGUYEN, T. G.; MITCHELL, A.; VISAGATHILAGAR, Y. S. Investigation of resonantly enhanced modulators on LiNbO_3 using FEM and numerical optimization technique. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 2, p. 526-533, 2004.

NINGHUA, Z.; RENMING, W.; ZIQIAN, W. Variational analysis of eigenmodes of integrated optical waveguides and applications. **Science in China (Series A)**, v. 38, n. 5, p. 608-617, 1995.

OBAYYA, S. S. A.; HAXHA, S.; RAHMAN, B. M. A.; THEMISTOS, C.; GRATTAN, K. T. V. Optimization of the optical properties of a deeply etched semiconductor electrooptic modulator. **Journal of Lightwave Technology**, v. 21, n. 8, p. 1813-1819, 2003.

PACHECO, P. S. **Parallel programming with mpi**. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1997. 418p.

PASSARO, A.; TANAKA, R. Y.; LIMA, O. F.; MURARO, A. JR.; ABE, N. M.; PRETO, A. J.; STEPHANY, S. Performance evaluation of different communication schemes on a parallel implementation of the conjugate gradient method. In: IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 27, 2006, Belém, Brasil. **Proceedings...** [S.l: s.n], 2006. CD-ROM.

PASSARO, A.; FRANCO, M. A. R.; ABE, N. M.; SIRCILLI NETO, F. The effect of the proton-concentration-to-refractive-index models on the propagation properties of APE waveguides. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 8, p. 1573-1577, 2002.

PETRARU, A.; SCHUBERT, J.; SCHMID, M.; BUCHAL, CH. Ferroelectric BaTiO_3 thin-film optical waveguide modulators. **Applied Physics Letters**, v. 81, n. 8, p.

1375-1377, 2002.

POULOS, P. N.; RIGATOS, G. G.; TZAFESTAS, S. G.; KOUKOS, A. K. A Pareto-optimal genetic algorithm for warehouse multi-objective optimization. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 14, n. 6, p. 737-749, 2001.

RAFIZADEH, D.; HO, S. T. Numerical analysis of vectorial wave propagation in waveguides with arbitrary refractive index profiles. **Optics Communications**, v. 141, p. 17-20, 1997.

RAHMAN, B. M. A.; HAXHA, S. Optimization of microwave properties for ultrahigh-speed etched and unetched lithium niobate electrooptic modulators. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 10, p. 1856-1863, 2002.

RENNER, H. Cutoff frequencies in diffusion-type power-law profile waveguides. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 33, n. 5, p. 724-730, 1997.

RODRÍGUEZ, J.; FERNÁNDEZ, S.; PALACIOS, S. L.; CRESPO, R. D.; FERNÁNDEZ, J. M.; GUINEA, A.; VIRGÓS, J. M.; OLIVARES, J. Equivalent-optical-waveguide model for the analysis of optical waveguides by means of an asymptotic effective-index method. **Applied Optics**, v. 34, n. 27, p. 6172-6179, 1995.

SAKHORNSAENG, C.; SOMKUARNPANIT, S.; KOOSIRIVANICHAKORN, P. The LiNbO₃ electrooptic modulator with four electrodes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGIES (ISCIT), 2001, ChiangMai, Thailand. **Proceedings...** [S.l]: ECTI, 2001. CSC-06.

SAKHNO, O. V.; GOLDENBERG, L. M.; STUMPE, J.; SMIRNOVA, T. N. Surface modified ZrO₂ and TiO₂ nanoparticles embedded in organic photopolymers for highly effective and UV-stable volume holograms. **Nanotechnology**, v. 18, n. 10, article n. 105704, 2007.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of photonics**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. 966p.

SCHMIDT, B.; XU, Q.; SHAKYA, J.; MANIPATRUNI, S.; LIPSON, M. Compact electro-optic on silicon-on-insulator substrates using cavities with ultra-small modal volumes. **Optics Express**, v. 15, n. 6, p. 3140-3148, 2007.

SILVESTER, P. P.; FERRARI, R. L. **Finite elements for electrical engineers**. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 494p.

SUÁREZ, I.; PERNAS, P. L.; LIFANTE, G. Integrated electro-optic Mach-Zehnder modulator fabricated by vapour Zn-diffusion in LiNbO₃. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 49, n. 5, p. 1194-1196, 2007.

SUHIR, E. Microelectronics and photonics-the future. **Microelectronics Journal**, v. 31, p. 839-851, 2000.

TANG, P.; MEIER, A. L.; TOWNER, D. J.; WESSELS, B. W. High-speed travelling-wave BaTiO₃ thin-film electro-optic modulators. **Electronics Letters**, v. 41, n. 23, 2005.

TANG, P.; TOWNER, D. J.; MEIER, A. L.; WESSELS, B. W. Low-loss electrooptic BaTiO₃ thin film waveguide modulator. **IEEE Photonics Techn. Letters**, v. 16, n. 8, p. 1837-1339, 2004.

TWU, R.-C.; HUANG, C.-C.; WANG, W.-S. Ridge-type Zn-indiffused Mach-Zehnder modulator in LiNbO₃. **IEICE Transactions on Electronics**, v. E90-C, n. 2, p. 481-483, 2007.

VASCONCELOS, J. A.; KRÄHENBÜHL, L.; NICOLAS, A. Simulated annealing coupled with the tabu search method for continuum optimization in electromagnetics. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 32, n. 3, p. 1206-1209, 1996.

VELHO, H. F. C. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. In: ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 4, 2001, Nova Friburgo, Brasil. **Anais...** [S.l.: s.n], 2001. Mini-curso.

WANG, Z.; ZHANG, J.; MENG, Q. Effect of the electrodes in an electro-optic polymer modulator on waveguide characteristics. **Zhongguo Jiguang / Chinese Journal of Lasers**, v. 34, n. 3, p. 379-382, 2007.

WEISE, T. **Global optimizations algorithms**: theory and application. Kassel, 2007. 846p. Disponível em <<http://www.it-weise.de/>>. Acesso em dez. 2007.

WOOTEN, E. L.; KISSA, K. M.; YI-YAN, A.; MURPHY, E. J. et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 6, n. 1, p. 69-81, 2000.

YANG, C.; SIMON D. A new particle swarm optimization technique. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING (ICSEng'05), 18, 2005, Luxembourg, Luxembourg. **Proceedings...** Las Vegas: University of Nevada Las Vegas, 2005. p. 164-169.

YANG, S. Y.; CARDOSO, J. R.; HO, S. L.; NI, P. H.; MACHADO, J. M.; LO, E. W. C. An improved tabu-based vector optimal algorithm for design optimizations of electromagnetic devices. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, n. 2, p. 1140-1143, 2004.

YANG, S.; MACHADO, J. M.; NI, G.; HO, S. L.; ZHOU, P. A self-learning simulated annealing algorithm for global optimizations of electromagnetic devices. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 36, n. 4, p.1004-1008, 2000.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method**. 4 ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1989. 648p.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.