



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
DEE - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUANA DA FRANÇA VIEIRA

PROJETO DE *TAPERS* UTILIZANDO
METAHEURÍSTICAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador - Bahia

2018

PROJETO DE *TAPERS* UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS

Luana da França Vieira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Dourado Sisnando.

Salvador - Bahia

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA), com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

da França Vieira, Luana
Projeto de Tapers Utilizando Metaheurísticas / Luana da
França Vieira. -- Salvador, 2018.
79 f.

Orientador: Vitaly Félix Rodriguez Esquerre.
Coorientador: Anderson Dourado Sisnando.
Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia Elétrica) --
Universidade Federal da Bahia, Politécnica, 2018.

1. Acopladores de guias de ondas. 2. Metaheurísticas . 3.
Algoritmo de colônia de formigas . 4. Busca Dispersa. 5. Óptica
Integrada. I. Félix Rodriguez Esquerre, Vitaly. II. Dourado
Sisnando, Anderson. III. Título.

LUANA DA FRANÇA VIEIRA

PROJETO DE TAPERS UTILIZANDO METAHEURÍSTICAS

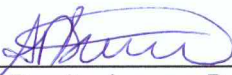
Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de *Mestre*.

APROVADA em: 20 de Março de 2018.

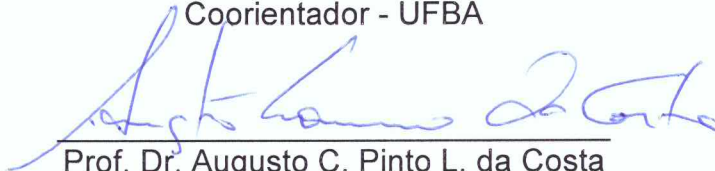
BANCA EXAMINADORA



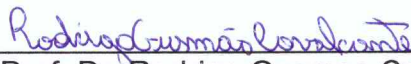
Prof. Dr. Vitaly Félix Rodriguez Equerre
Orientador - UFBA



Prof. Dr. Anderson Dourado Sisnando
Coorientador - UFBA



Prof. Dr. Augusto C. Pinto L. da Costa
UFBA



Prof. Dr. Rodrigo Gusmao Cavalcante
IFBA

Agradecimentos

Não seria possível enumerar a quantidade de pessoas que foram essenciais para a minha vida. Agradeço a Deus, primeiramente, sem o qual jamais seria possível suportar tamanha jornada.

Ao Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre, pela orientação, pelo apoio, pela oportunidade, pelo incentivo constante, pela paciência e principalmente por acreditar na minha evolução.

Aos grandes amores da minha vida, Maria Crispiniana da França Vieira (*in memoriam*), Soraia da França Vieira, Joventino Antonio Vieira e Terezinha de Jesus Vieira, por serem o suporte da minha sobrevivência mental e física, quanto orgulho eu tenho dessas pessoas, as quais foram capazes de me ensinar toda a grandeza de um ser humano e por sempre acreditarem em mim, da forma mais pura possível.

Ao Dr. Anderson Dourado Sisnando, por todo conhecimento fornecido, pela paciência e pelo incentivo constante.

Ao Dr. Cosme Eustaquio Rubio Mercedes, pela disposição para ensinar, sempre explicando os detalhes envolvidos em conceitos essenciais deste trabalho.

A Diego Souza Bezerra, pelo tempo que se disponibilizou a auxiliar no uso de ferramentas essenciais para o trabalho desenvolvido.

Ao pessoal do Laboratório de Telecomunicações da Escola Politécnica da UFBA, Davi Franco Rêgo, Gabriel Couto, Ícaro Sampaio, Tulio Freitas, Karcius Day, Joaquim Lima, Emanuela Paranhos, Victor Mata, Juarez Caetano, Pedro Barreto, Davi Araújo, Igor Souza, Miriele Paim, Rafael Andrade, os quais foram essenciais para manutenção do foco nas pesquisas.

A Ágatha Sampaio, sempre tão competente e mostrando muita disposição para ajudar nos assuntos relacionados a pós-graduação.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pela concessão da bolsa de dedicação exclusiva e apoio financeiro.

“Já levou 500 socos na cara em uma noite só? Depois de um tempo começa a doer.”
(Rocky 2 – A Revanche)

Resumo

O presente trabalho trata da implementação de algoritmos baseados nas técnicas de otimização por colônia de formigas (ACF) e da Busca Dispersa (BD) juntamente com o método de Elementos Finitos (MEF) para modelagem e otimização de acopladores de guias de ondas entre um guia de ondas contínuo 2D (CWG) e um guia de ondas periodicamente segmentado 2D (PSW). A metodologia aplicada nas metaheurísticas encaixa-se em problemas de otimização combinatória, onde diante de uma grande quantidade de subconjuntos disponíveis, é possível selecionar os conjuntos que produzem as melhores eficiências de acoplamento. As metaheurísticas propostas criam novas possibilidades para otimizar e projetar uma variedade de dispositivos fotônicos para processamento de informações. A validade dos algoritmos foi verificada pelos resultados da otimização de acopladores de guias de ondas.

Palavras-chave: Acopladores de guias de ondas; metaheurísticas; algoritmo de colônia de formigas; busca dispersa; óptica integrada.

Abstract

The present work deals with the implementation of algorithms based on the techniques of optimization by ant colony (ACO) and Scatter Search (SS) together with the Finite Element method (MEF) for modeling and optimization of waveguide couplers between a continuous 2D waveguide (CWG) and a periodically segmented 2D waveguide (PSW). The methodology applied in the metaheuristics fits into combinatorial optimization problems, where in front of a large number of available subsets, it is possible to select the sets that produce the best coupling efficiencies. The proposed metaheuristics create new possibilities for optimizing and designing a variety of photonic devices for information processing. The validity of the algorithms was verified by the results of the waveguide couplers optimization.

Keywords: *tapers, metaheuristics, ant colony algorithm, Scatter Search, integrated optics.*

Lista de Figuras

2.1	Modelo do <i>taper</i> entre o guia de onda contínuo (CWG) e o guia de onda segmentado (PSW) [19-20,30].	20
2.2	Representação da malha, (b) Ampliação da região marcada na Figura 2.2(a).	30
3.1	Esquemático do Comportamento das formigas em busca de alimentos. Adaptado de [59].	32
3.2	Grafo representando a escolha da formiga por uma determinada aresta ij	34
3.3	Esquemático do comportamento da formiga no espaço de busca na seleção do alimento.	39
3.4	Fluxograma do algoritmo baseado em ACF.	40
3.5	Ações <i>Daemon</i> para a evaporação de feromônio menos intensa.	41
3.6	Ações <i>Daemon</i> para a evaporação de feromônio mais intensa.	42
3.7	Pseudocódigo do algoritmo baseado em ACF.	44
4.1	Fluxograma do algoritmo SS. Adaptado de [69] e [70].	50
4.2	Representação da BD para o subconjunto do tipo 2 e conjunto de referência de tamanho $b = 10$	53
4.3	Fluxograma para o algoritmo BD melhorado.	54
4.4	Pseudocódigo do algoritmo BD.	55
5.1	Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores formigas do ACF, ao considerar uma evaporação do feromônio MENOS INTENSA.	59
5.2	Estrutura resultante do <i>taper</i> segmentado otimizada pelo ACF e seus respectivos valores de comprimentos de segmentos com 10 formigas e evaporação de feromônio MENOS INTENSA.	60
5.3	Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pelo ACF com 10 formigas e evaporação de feromônio MENOS INTENSA.	60
5.4	Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para evaporação de feromônio MENOS INTENSA.	60

5.5	Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores formigas do ACF, ao considerar uma evaporação de feromônio MAIS INTENSA.	61
5.6	Estrutura resultante do <i>taper</i> segmentado encontrado pelo ACF com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos com 10 formigas e evaporação de feromônio MAIS INTENSA.	61
5.7	Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pelo ACF com 10 formigas e evaporação de feromônio MAIS INTENSA.	61
5.8	Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para evaporação do feromônio MAIS INTENSA.	62
5.9	Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 1.	62
5.10	Estrutura resultante do <i>taper</i> segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 1.	63
5.11	Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BD, ao considerar subconjunto do TIPO 1.	63
5.12	Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 1.	63
5.13	Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 2.	64
5.14	Estrutura resultante do <i>taper</i> segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 2.	64
5.15	Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BB e subconjunto do TIPO 2.	64
5.16	Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 2.	65
5.17	Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 3.	65
5.18	Estrutura resultante do <i>taper</i> segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 3.	66
5.19	Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BB e subconjunto do TIPO 3.	66
5.20	Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 3.	66

5.21	Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 4. .	67
5.22	Estrutura resultante do <i>taper</i> segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 4.	67
5.23	Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BB e subconjunto do TIPO 4.	67
5.24	Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 4.	68

Lista de Tabelas

4.1	Conjunto de Referência com cada uma das suas possíveis soluções e seus respectivos valores de função objetivo.	52
4.2	Possibilidades de subconjuntos gerados por cada tipo de subconjunto relacionados às soluções da Tabela 4.1.	52
5.1	Resultados do ACF.	57
5.2	Resultados da BD.	57

Lista de Abreviaturas e Siglas

MEF - Método de Elementos Finitos

PML - *Perfect Matched Layer* (camada perfeitamente casada)

ACF - Algoritmo de Colônia de Formigas

AG - Algoritmo Genético

BD - Busca Dispersa

CWG - *Continuous Waveguide* (guia de onda contínuo)

PSW - *Periodically Segmented Waveguide* (guia de onda periodicamente segmentado)

Si - Silício

SiO₂ - Sílica

SOI - Substrato de silício sobre isolador

BPM - *Beam Propagation Method* (método de propagação do feixe)

FDTD - *Finite Difference Time Domain* (método das diferenças finitas no domínio do tempo)

MFD - *Mode field diameter* (diâmetro de campo de modo)

EME - *Eigen Mode Expansion* (método de Expansão de modos próprios)

SWG - *Conventional Silica Waveguide* (guia de onda de sílica convencional)

PCSWG - *Photonic Crystal Slab Waveguide* (guia de ondas de placas de cristal fotônico)

PPCWG - *Planar Photonic Crystal Waveguide* (guia de ondas de cristal fotônico planar)

SIA - Sistema Imunológico Artificial

ED - Evolução Diferencial

SA - *Simulated Annealing* (recozimento simulado)

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Metodologia	17
1.4	Organização do trabalho	17
2	<i>TAPER</i>, MEF e PMLs	19
2.1	Introdução	19
2.2	ESTADO DA ARTE DE <i>TAPERS</i>	21
2.2.1	Detalhes sobre MEF e PMLs	28
3	ALGORITMO DE COLÔNIA DE FORMIGAS (ACF)	31
3.1	Introdução	31
3.2	Detalhes da Implementação do ACF	36
4	ALGORITMO BUSCA DISPERSA (BD)	45
4.1	Introdução	45
4.2	Implementação da Busca Dispersa (BD)	50
5	Resultados	56
5.1	Introdução	56
6	Conclusão	69
6.1	Trabalho completo publicado em anais de congressos durante o mestrado: .	70

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Nas últimas décadas, o estudo e desenvolvimento de novos dispositivos fotônicos têm promovido uma evolução nas telecomunicações [1-3]. O uso de algoritmos inspirados na natureza está se tornando cada vez mais comum na otimização de estruturas fotônicas [4-5].

Com o avanço nos sistemas de comunicações ópticas, uma grande variedade de dispositivos de guias de ondas foi desenvolvida para suprir a demanda pela comunicação em alta velocidade, guias de onda de alto desempenho são essenciais para atender essa busca. O método de otimização por meio da alteração da topologia tem chamado muita atenção, uma vez que possui muita flexibilidade e a capacidade para projetar dispositivos de alto desempenho [6].

Muitos estudos sobre a análise e projeto de *tapers* ou acopladores de guias de ondas [7-23] têm sido considerados, por serem eficazes no acoplamento de potência.

Algoritmos bio-inspirados têm sido cada vez mais aplicados à otimização de dispositivos fotônicos por suas características importantes de busca em grupo, paralelismo implícito e com a finalidade de obter soluções viáveis [23].

Algoritmos evolutivos podem ser aplicados praticamente em qualquer problema, desde que esse, possa ser formulado como função objetivo, e possuem uma quantidade considerável de vantagens identificadas, tais como: flexibilidade dos procedimentos e capacidade de adaptação em busca de soluções ótimas [24]. Isso faz com que, se torne viável a aplicação do algoritmo evolutivo aos problemas propostos, uma vez que amplia o espaço de busca por soluções ótimas.

O método de otimização de topologia é baseado em análise de elementos finitos. A fim de melhorar o desempenho de um dispositivo, várias etapas de modificação de parâmetros são aplicadas. Tal técnica pertence a uma classe de otimização capaz de

encontrar estruturas otimizadas sem que se tenha sido definida previamente qualquer geometria, uma vez que ela trabalha não somente com a forma da geometria, mas também com a configuração topológica [25]. Otimização de topologia de estruturas é uma técnica bem-sucedida para o projeto de dispositivos ópticos [26].

Os algoritmos de otimização por Colônia de Formiga (ACF) e a Busca Dispersa (BD) são metaheurísticas, que apresentam padrões bem estabelecidos, maturidade em suas concepções e ao mesmo tempo com características bem diferentes, tornando-os capazes de serem utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. O algoritmo de colônia de formigas apresenta um tratamento para construção de soluções juntamente com a utilização de operadores estocásticos. Já a BD é baseada em população e faz a utilização de operadores, fundamentalmente, determinísticos [27].

Os circuitos elétricos convencionais podem ser superados pelos circuitos ópticos ao se considerar a integridade do sinal e o consumo de energia. Uma fonte externa é usualmente conectada a um circuito fotônico integrado, o que viabiliza luz na faixa infravermelha (por exemplo, $\lambda \approx 1,55\mu\text{m}$) [21].

Os *tapers* ou acopladores de guias de ondas dielétricos são estruturas fotônicas que têm sido apresentados com objetivo de acoplar guias de ondas com geometrias diferentes, na tentativa de manter uma máxima eficiência de acoplamento [31]. *Tapers* de diferentes tipos podem ser usados para acoplar guias de ondas ópticos com diferentes seções transversais [32].

Projetar *tapers* para atingir um acoplamento eficiente entre guias de ondas ópticos diferentes é um objeto de estudo em diferentes pesquisas de fotônica [33-35]. *Taper* é uma forma geral de um guia de onda e sua seção transversal tem uma variação contínua ao longo do seu comprimento z . Eles têm a funcionalidade de acoplar a luz de um guia de ondas em outro com características diferentes [36].

O controle de sinais em uma área muito pequena pode ser feito por dispositivos nanofotônicos de silício. O desempenho desses dispositivos foi citado por muitos estudos no decorrer da última década [21,37-39].

1.2 Objetivos

Este trabalho realiza a otimização de dispositivos fotônicos através da modificação de parâmetros geométricos dos dispositivos e o objetivo é maximizar a transferência de potência usando metaheurísticas juntamente com o Método de Elementos Finitos (MEF) e uma camada de adaptação, a camada perfeitamente casada (PML), gerando desta forma a possibilidade de análise do desempenho de *tapers* e da investigação dos fatores envolvidos na geração e otimização de dispositivos fotônicos. Além de priorizar etapas dos ACF e

BD, que possam gerar melhores resultados no processo de otimização.

1.3 Metodologia

Foram utilizadas como ferramentas para otimização das estruturas os softwares: Matlab e o Dev-C++ e um gerador de malhas de elementos finitos. Com o gerador de malhas foi possível projetar as malhas e escolher os materiais responsáveis pela composição das mesmas, além de definir a importância de cada componente da malha. Foram configurados os tamanhos dos elementos na malha e os materiais das PMLs. Uma maior quantidade de elementos foi inserida nas regiões de maior interesse. Para otimização da eficiência de acoplamento, a variação do comprimento dos segmentos foi escolhida. Com a associação do Dev-C++ e do Matlab foi possível a criação de novas estruturas otimizadas através das metaheurísticas (ACF e BD). Com o Dev-C++ foi responsável por construir as novas estruturas e enviar para o gerador de malhas, de acordo com os comprimentos de segmentos enviados do Matlab para o Dev-C++. Ele foi responsável por realizar a comunicação entre o gerador de malhas e o Matlab. Foi utilizado o trabalho [79] para realizar os cálculos do MEF.

Para realização do trabalho, além do Algoritmo de Otimização de Colônia de Formigas (ACF), foi utilizada uma variante do algoritmo de colônia de formigas, denominado Sistema Elitista de Formigas (EAS) do autor Dorigo [29], trata-se de um melhoramento do Sistema de Formigas (AS), que adiciona o procedimento do elitismo. O processo é usado para manter nas gerações o melhor até então, nas arestas, que fazem parte do caminho da formiga considerada mais favorável, e dessa forma existe um depósito complementar nas arestas relacionadas aos melhores caminhos.

Além do ACF, foi implementado um melhoramento do algoritmo BD, sempre buscando reforçar os procedimentos mais relevantes para a aplicação em questão deste trabalho.

A codificação dos algoritmos foi realizada com números reais, mas poderia ter sido realizada com uma codificação binária. Para ambos os algoritmos o critério de parada foi estabelecido igualmente, no caso específico foi considerado o número de gerações.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. O presente capítulo apresenta uma motivação para a leitura deste trabalho, os objetivos e a metodologia utilizada para alcançar os resultados desejados na otimização de dispositivos. O Capítulo 2 apresenta o problema a ser resolvido, uma revisão bibliográfica relacionada a *tapers* e métodos

utilizados para resolução dos problemas, além de uma abordagem teórica sobre taper, o MEF e PMLs.

O Capítulo 3 apresenta uma abordagem teórica do ACF, juntamente com os detalhes da implementação relacionada. O Capítulo 4 apresenta uma abordagem teórica para a BD e também detalha a implementação relacionada. O Capítulo 5 aborda os resultados gerados com a otimização do taper ao utilizar as metaheurísticas propostas, juntamente com o MEF. O Capítulo 6 conclui este trabalho, retomando as principais ideias, resultados e propondo futuras implementações, além de apresentar uma das publicações geradas durante o período do mestrado.

Capítulo 2

TAPER, MEF e PMLs

2.1 Introdução

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Telecomunicações da Escola Politécnica da UFBA e seu principal objetivo é maximizar a transferência de potência através da otimização do dispositivo fotônico considerado: *Taper*. O modelo do *Taper* utilizado no trabalho está representado na Figura 2.1.

O *Taper* possui uma região com comprimentos dos segmentos variáveis e com período fixo (tamanho da região composta pelo segmento com silício e sílica) em $0,3 \mu\text{m}$, e a sua extensão é constituída de 15 segmentos, cada segmento pode assumir valores no intervalo $[0,03\mu\text{m}, 0,27\mu\text{m}]$. Os comprimentos dos segmentos são representados por elementos do vetor $\mathbf{a}_i$ e a estrutura da Figura 2.1, é composta de silício e sílica, sendo que o índice de refração do segmento e do guia de onda é $n_1 = 3,476$ (silício) e o índice de refração do substrato e da outra metade do segmento é $n_2 = 1,444$ (sílica). O comprimento de onda utilizado é $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ [19-20,30].

Na Figura 2.1 é apresentada a geometria e o domínio computacional da estrutura a ser otimizada como base para o *Taper* segmentado. A seguinte limitação do domínio computacional foi utilizada: $z[-7\mu\text{m}, 9,9\mu\text{m}]$, $y[0\mu\text{m}, -2,65\mu\text{m}]$, devido à simetria existente, por isso não é necessário escrever o intervalo do eixo y completamente. O *Taper* tem início em $z = 0$. O modo fundamental de entrada do guia de onda contínuo, com um comprimento de $0,3 \mu\text{m}$, foi considerado como campo incidente, com um campo elétrico polarizado ao longo da direção x , colocado em $z = -2\mu\text{m}$. Os segmentos têm um comprimento e um período fixo $\Lambda = w = 0,3\mu\text{m}$ [19-20,30]. Foram utilizados 15 segmentos devido à questão do tamanho do *taper*.

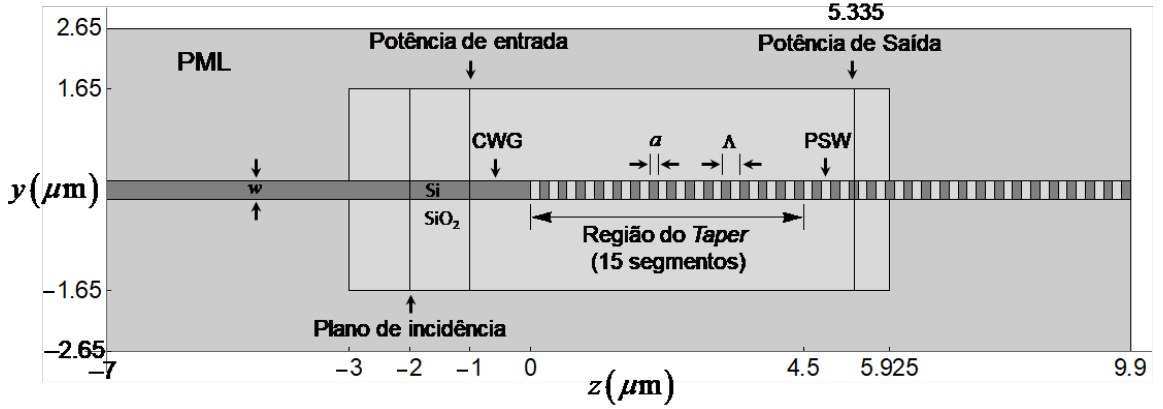


Figura 2.1: Modelo do *taper* entre o guia de onda contínuo (CWG) e o guia de onda segmentado (PSW) [19-20,30].

As potências de entrada (P_{in}) e de saída (P_{out}) foram calculadas através da integração da componente z do vetor de Poynting (S_z) nos planos $z = -1\mu\text{m}$ e $z = 5,335\mu\text{m}$. O objetivo deste trabalho é maximizar a eficiência de acoplamento dada pela razão seguinte [19-20,30]:

$$E_{ff} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.1)$$

O problema de otimização do *taper* pode ser formulado de forma simplificada da seguinte maneira:

Maximizar $f(a_i)$

Sujeito a: $0,03\mu\text{m} \leq a_i \leq 0,27\mu\text{m}$, onde $i = 1, \dots, 15$.

onde $f(a_i)$ é a eficiência de acoplamento e os elementos do vetor a_i de tamanho 15 representando o conjunto dos comprimentos dos segmentos.

A eficiência de acoplamento é a função objetivo do problema e a restrição do problema está relacionada ao conjunto de comprimentos de segmentos que formam o *taper*. A restrição é para garantir que os comprimentos pertençam a um intervalo contínuo que variam de $0,03\mu\text{m}$ até $0,27\mu\text{m}$, sendo que para cada *taper* serão necessários 15 comprimentos de segmentos, a serem otimizados, com a finalidade de alcançar o máximo de eficiência de acoplamento possível.

A região de conexão entre os guias de ondas foi particionada em segmentos com índices de refração diferentes, com a finalidade de transferir máxima potência de um guia para outro. Os índices de refração aplicados nos componentes foram o índice da sílica e do silício. A função objetivo (de custo) é a razão entre a potência recebida pelo guia de onda de saída e a potência para o guia de entrada. Para cálculo das potências, foi utilizado o MEF e foram consideradas a propagação das ondas e os limites de integração através dos guias de ondas.

Ao serem alterados os elementos do vetor $\mathbf{a}$ de todas as seções, as transmissões também são alteradas. Para encontrar quais valores devem ser utilizados para maximizar a transmissão, técnicas de otimização foram utilizadas (as técnicas ACF e BD).

A modificação de um feixe de luz em um circuito integrado pode ser realizada por um *taper* de um guia de onda, ou seja, uma estrutura com os parâmetros de um guia de onda que são alterados progressivamente ao longo do seu comprimento [9].

A fabricação de guias de onda e cristais fotônicos é possibilitada por materiais de alto índice de refração. O comprimento do *taper* convencional é da ordem de milímetros, a fim de evitar os modos de radiação no *taper* [11].

O *taper* pode alterar as características do modo que se propaga no guia (área modal, constante de propagação), para otimizar o acoplamento entre dois guias de ondas diferentes [13,18]. O acoplador é constituído por diferentes subdivisões de guias de ondas não-periódicos, onde as medidas podem ser determinadas utilizando um algoritmo de otimização [14].

Em circuitos ópticos integrados, as perdas podem acontecer em qualquer área compartilhada entre os componentes locais, dessa forma é indispensável que as eficiências de acoplamento sejam as mais altas possíveis, pois existe uma integração em todo o sistema. A estrutura do *taper* influencia de forma considerável na eficiência de acoplamento [15].

Guias de ondas em diferentes dispositivos tendem a ser projetados com diferentes seções transversais, com o objetivo de atuar em funções diversas, ainda que em um único dispositivo [18]. Em [18], o *taper* foi projetado para limitar a ocorrência de radiação e a transformação de modos para modos de ordem superior dentro de guias de ondas.

Por causa do alto contraste do índice de refração existente entre o núcleo do silício $n_1 = 3,476$ e o revestimento de sílica $n_2 = 1,444$, a largura do guia de ondas é bastante estreita, algo em torno de $0,5\mu\text{m}$, usualmente, em dispositivos compactos de silício [18].

Tapers de guias de onda são decisivos para realização do acoplamento entre dispositivos de dimensões variáveis [22]. Em [23], foi analisada a relação entre o comprimento do *taper* e a eficiência de acoplamento e foi possível observar que para atingir eficiências superiores a 80%, o comprimento do *taper* deveria ser superior a $1000\mu\text{m}$, o que se trata de um valor muito alto para integração em um chip, por isso é necessário estudos mais aprofundados sobre o problema.

2.2 ESTADO DA ARTE DE *TAPERS*

Nesta seção encontra-se uma documentação sobre o que foi realizado no campo de estudo sobre *tapers*, métodos encontrados na literatura, eficiências alcançadas, comprimentos de onda e suas geometrias relacionadas.

Em [9], foi realizado um estudo com um *taper* não linear de um guia de onda de InGaAsP/InP de duas camadas. A parte superior do guia de ondas consiste em um material de índice de refração ($n_u = 3,40$), enquanto que para a parte inferior foi utilizado um material com índice de refração ($n_b = 3,24$). A camada superior com comprimento de $1,2 \mu\text{m}$ e altura 300 nm em combinação com a camada inferior com comprimento de $2,4 \mu\text{m}$ e altura 115 nm). Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores próximos a 95% . Foi utilizado um algoritmo vetorial completamente tridimensional não equidistante, incluindo uma condição de contorno transparente. A influência da configuração do *taper* sobre o comportamento da perda foi avaliada por simulação numérica. A simulação começa com o modo do guia de onda propagando-se através do *taper* até várias centenas de μm no guia de onda de saída. A perda de acoplamento para a fibra foi aproximada por uma integral de acoplamento. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [10], foi realizado um estudo com *tapers* tridimensionais de silício. O núcleo do guia de onda, revestimento superior e materiais de revestimento inferior foram obtidos como Si ($n_1 = 3,48$), SiO_2 ($n_2 = 1,5$) e ar ($n_3 = 1$), respectivamente. As dimensões das faces de entrada e saída foram assumidas como sendo $h_1 = 10 \mu\text{m}$. Foi usado um comprimento de *taper* de $600 \mu\text{m}$. Foram alcançadas eficiências de transmissão acima de 82% . Simulações foram realizadas para determinar a variação na eficiência de acoplamento com o comprimento do *taper* para as várias alturas de guia de ondas centrais. A análise teórica de acopladores verticais simétricos foi realizada com um método de propagação do feixe 2D ou *Beam Propagation Method* (BPM) 2D. Foram também realizadas simulações para determinar a variação na eficiência de acoplamento com o comprimento de *taper* para as várias alturas de guia de ondas centrais. Foram realizadas simulações para as várias alturas de guia de ondas centrais (h_2), $0,25$ e $1 \mu\text{m}$. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [11], foi realizado um estudo com um *nanotaper* baseado em SOI (substrato de silício sobre isolador). A altura e a largura do guia de onda foram tomadas como $h = 250 \text{ nm}$ e $w_d = 450 \text{ nm}$, respectivamente. O núcleo do guia de onda e os materiais de revestimento foram Si ($n_1 = 3,48$) e SiO_2 ($n_2 = 1,46$), respectivamente. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores com o máximo de 94% . As simulações foram realizadas com o BPM e o método das diferenças finitas no domínio do tempo ou *Finite Difference Time Domain* (FDTD) 2D e 3D. Como referência de modo de entrada, foi utilizada uma fibra óptica de modo único, com um índice efetivo de $n_{\text{eff}} = 1.468$ e um diâmetro de campo de modo ou *Mode field diameter* (MFD) de $4,9 \mu\text{m}$, o que corresponde ao MFD de uma fibra óptica dopada com érbio típica. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [12], foi realizado um estudo com guias de onda AlGaAs adicionando uma

estrutura de um *taper* em cada extremidade. Todas as estruturas possuem um núcleo $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ ($n_x = 3.3$) de 200 nm de espessura acima de um revestimento inferior $\text{Al}_{0.97}\text{Ga}_{0.03}\text{As}$ ($n_y = 1.61$) de 2,5 μm de espessura. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores acima de 90%. Foram otimizados parâmetros das duas geometrias de *tapers* através de simulações. Foram simulados e otimizados a face final das geometrias, usando um esquema de domínio de frequência de diferença finita semi-vetorial. A eficiência de acoplamento é determinada pela integral de sobreposição entre os campos de cada lado da interface, dessa forma o tamanho do modo deve ser transformado em direção às extremidades do dispositivo. As simulações indicaram que o *taper* de guia de ondas convencional produziria uma eficiência de acoplamento de 32% com uma largura ótima de 4 μm . Por outro lado, as simulações indicaram que um *taper* de guia de onda inverso para aproximadamente 170 nm de comprimento renderia uma eficiência de acoplamento de pouco mais de 90%. Não foi informado o comprimento de onda utilizado.

Em [13], foi realizado um estudo com *taper* entre guias de ondas planares com a mesma estrutura de camada vertical de SOI, mas com diferentes larguras horizontais, ou seja, 0,5 e 2,0 μm , e para comprimentos de *taper* entre 0,5 e 3,0 μm . Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores acima de 98%. Dois algoritmos diferentes foram propostos para construir configurações diferentes de *tapers* lineares e parabólicos e comparados usando cálculos bidimensionais (2D). Apesar de o algoritmo baseado em blocos teoricamente produzir melhores resultados do que a abordagem baseada em curvas, considerações práticas feitas levaram a escolha do algoritmo baseado em curvas para uma implementação em um cálculo tridimensional (3D). Para ser eficiente em termos de tempo, um modelo unidirecional de 3D foi aplicado para a otimização e depois verificado usando o Método de Expansão de modos próprios ou *Eigen Mode Expansion* (EME) bidirecional completo. Para descobrir quais valores de largura $[W_1, W_2, \dots, W_N]$ conduzem a uma boa transmissão, uma alteração das larguras W_i 's de todas as seções do *taper* por meio do Algoritmo Genético (AG). Foi utilizada uma faixa de comprimento de onda entre 1,5 μm e 1,6 μm .

Em [14], foi realizado um estudo com *taper* de guia de onda conectando guias de ondas ópticos com comprimentos de 10 μm e 0,56 μm , guias de ondas ópticos com SOI. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de no máximo 72%. Dimensões das seções do acoplador são determinadas usando algoritmo genético e uma otimização local adicional, além do método FDTD. Como um alto contraste de índice de refração pode facilmente levar à reflexão, um método de simulação bidirecional tem que ser usado para calcular essas estruturas. Por razões de velocidade e análise modal fácil, um EME no domínio da frequência, com uma camada perfeitamente casada como condição de limite absorvente foram escolhidos sobre o método FDTD. Foi utilizado o comprimento de onda

de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [15], foi realizado um estudo com quatro tipos de *tapers*, assim como a interface entre um guia de onda de sílica convencional (SWG) e um guia de ondas de placas de cristal fotônico (PCSWG). A largura do SWG é de $2,4 \mu\text{m}$. O meio circundante em um guia de ondas de cristal fotônico planar (PPCWG) tem um índice de $1,444$, que corresponde ao da sílica (SiO_2). O SWG está em um revestimento de SiO_2 . O SWG possui um índice dielétrico de $1,444$ e o meio dielétrico circundante é ar ($n = 1$). Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores acima de 90% . Foi apresentada uma técnica de acoplamento usando cálculos 2D e 3D para acoplar luz eficientemente a partir da entrada convencional de guia de onda de sílica (SWG) e saída de um guia de ondas de placas de cristal fotônico (PCSWG) em uma rede quadrada de hastes dielétricas usando o método FDTD 2D e 3D. Vários parâmetros importantes foram investigados para garantir um maior alcance de tolerância para a imprecisão na fabricação. A eficiência do acoplamento é encontrada para ser altamente sensível à estrutura do *taper*, à configuração da haste e à espessura do guia. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [16], foi realizado um estudo com um acoplador de guia de onda ultracompacto entre guias de ondas com SOI. As espessuras e os índices de refração da camada de silício e da camada de sílica são $h_{si} = 250 \text{ nm}$, $n_1 = 3,476$ e $h_b = 5 \mu\text{m}$, $n_2 = 1,444$, respectivamente. A sílica também é usada para preencher o conector e como uma camada de revestimento superior cobrindo toda a estrutura. Os comprimentos do guia de ondas utilizados foram $w_1 = 400 \text{ nm}$, $w_2 = 100 \text{ nm}$, $w_3 = 260 \text{ nm}$. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de máximo de 97% . Foi realizada a otimização de parâmetros geométricos, foram avaliadas as relações entre eficiência de acoplamento e as seguintes características: comprimento de *taper*, largura da extremidade e comprimento de onda. Para alcançar um acoplamento de luz de alta eficiência, foram combinados dois *tapers* complementares para formar o acoplador proposto. Um acoplador altamente eficiente ultracompacto entre guias de onda foi projetado, simulado e fabricado. Foi utilizada uma faixa de comprimento de onda entre $1,200 \mu\text{m}$ e $1,800 \mu\text{m}$.

Em [17], foi realizado um estudo com um acoplador com um *taper* curto otimizado em SOI. A estrutura de grade é de cerca de $10 \mu\text{m}$ a $20 \mu\text{m}$ de comprimento. Para um acoplador de rede linear, a estrutura de rede é adiabaticamente ligada a uma guia de ondas de modo único por um *taper* longo, cujo comprimento é de cerca de $150 \mu\text{m}$. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de no máximo 68% . O tamanho do *taper* é otimizado para melhorar a eficiência de acoplamento. Dois parâmetros do *taper* foram projetados e otimizados, um deles foi o comprimento do *taper*, e o outro o ângulo do *taper*. Uma eficiência de acoplamento experimental de 68% a $1556,24 \text{ nm}$ foi obtida após a otimização e o tamanho total da grade é de $12 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, com uma

transição cônica muito curta de $\sim 15 \mu\text{m}$ de comprimento. Ao otimizar os parâmetros da estrutura, incluindo o número do período, a distância, a profundidade de gravura e o fator de preenchimento, a maior eficiência de acoplamento pode ser ajustada para aparecer em um comprimento de onda desejado. Foi utilizada uma faixa de comprimento de onda entre $1,540 \mu\text{m}$ e $1,575 \mu\text{m}$.

Em [18], foi realizado um estudo com um acoplador com um *taper* de guia de onda baseado em SOI, que conecta uma guia de onda de saída de $0,5 \mu\text{m}$ de comprimento e uma guia de onda de entrada de $12 \mu\text{m}$ de comprimento. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de 98,3%. Uma constante α é escolhida para gerar maiores transmissões. Tal constante está relacionada a uma equação que envolve características do *taper* e ela é utilizada para identificar a condição adiabática do *taper*. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [19], foi realizado um estudo com um acoplador com um *taper* entre guias de ondas. Índice de refração do segmento e guia de onda $n_1 = 3,476$; índice de refração do revestimento $n_2 = 1,444$ e comprimento do guia de onda $w = 0,3 \mu\text{m}$. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores acima de 97%. Foram utilizados algoritmos evolutivos baseados no Sistema Imunológico Artificial (SIA) e AG em conjunto com o MEF. Para otimização foram variados os comprimentos dos segmentos do *taper*. O impacto das taxas de mutação para o sistema imunológico artificial e o número da população inicial para o algoritmo genético também foi analisado em detalhes. A eficiência de acoplamento das estruturas otimizadas em função do comprimento de onda operacional também foi analisada. Depois de otimizar o *taper* segmentado, usando algoritmos bio-inspirados para o comprimento de onda da operação $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Eles foram testados para operar em diferentes comprimentos de onda $\lambda[1,50 \mu\text{m}; 1,60 \mu\text{m}]$ para verificar o comportamento de cada dispositivo com a variação de λ . Durante a otimização foi utilizado $1,55 \mu\text{m}$. Após a otimização foi utilizada uma faixa de comprimento de onda entre $1,50 \mu\text{m}$ e $1,60 \mu\text{m}$.

Em [20], foi realizado um estudo com um *taper* entre guias de ondas. Considerado um guia de onda de silício e sílica com alternância índices de refração $n_1 = 3,476$ e $n_2 = 1,444$ de revestimento e comprimento $w = 0,3 \mu\text{m}$. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de máximo 91,27%. Foi utilizado o algoritmo de evolução diferencial (ED) em conjunto com MEF. Para otimização foram variados os comprimentos de segmentos do *taper*. Foram avaliadas configurações de *taper* ao alterar fatores de ponderação, probabilidade de cruzamento e tamanho da população. Depois de otimizar o *taper* segmentado, usando algoritmo de evolução diferencial para o comprimento de onda da operação $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ foram testadas para o melhorar o método, estruturas de cada comprimento de onda diferente $\lambda[1,5 \mu\text{m}; 2 \mu\text{m}]$ para verificar o comportamento de cada dispositivo com a variação de λ . Durante a otimização foi utilizado $1,55 \mu\text{m}$. Após a

otimização foi utilizada uma faixa de comprimento de onda entre $1,5 \mu\text{m}$ e $2 \mu\text{m}$.

Em [21], foi realizado um estudo com um *taper* inverso de fibra-chip com refletores de silício. A largura do acoplador é gradualmente aumentada de 80 nm para 450 nm e seu comprimento é fixado a $150 \mu\text{m}$ para reduzir a perda do acoplamento através do *taper*. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores acima de 84% . Otimização de parâmetros do projeto dos refletores maximizam a eficiência do acoplador. Uma simulação numérica avaliou a eficiência do acoplador com o refletor. Um acoplador inverso convencional tem a desvantagem de uma pequena área de acoplamento. Para superar a desvantagem, foi proposto um acoplador inverso com refletores. Para avaliar melhorias na eficiência de acoplamento e a otimização de parâmetros do refletor foi realizada uma simulação numérica usando o software COMSOL Multiphysics Inc. Os seguintes parâmetros foram otimizados no projeto: período de padrões repetitivos, largura do dente da grade, número de dentes da grade do primeiro refletor, espaço do centro do *taper* do primeiro refletor, ângulo do primeiro refletor, número de dentes da grade do segundo refletor, espaço do centro do *taper* do segundo refletor, ângulo do segundo refletor, espaço entre primeiro e segundos refletores e comprimento dos refletores. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [22], foi realizado um estudo com um *taper* de guia de onda ultracompacto em plataforma de nitreto de silício. O *taper* é definido usando uma função senoidal quadrática e é altamente robusto para imperfeições de fabricação. O *taper* tem apenas $19,5 \mu\text{m}$ de comprimento com uma perda de inserção tão baixa quanto $0,22 \text{ dB}$ a 1550 nm . Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de no máximo de 95% . O EME e o método FDTD foram utilizados para otimizar os parâmetros do *taper*. Os algoritmos foram utilizados para otimizar os parâmetros para alcançar o *taper* com alta transmissão entre as seções do guia de ondas. Os parâmetros ótimos foram encontrados por simulação numérica usando varreduras paramétricas iterativas, com refinamento de parâmetros. Foram analisados os efeitos dos parâmetros a , b e c no perfil do *taper*. Tais parâmetros estão associados a uma fórmula de interpolação, que define o *taper*. Cada um desses parâmetros possuem uma limitação em seus valores, a cada mudança que é realizada nesses parâmetros, o resultado da fórmula de interpolação é alterado. Foi utilizada uma faixa de comprimento de onda entre $1,480 \mu\text{m}$ e $1,640 \mu\text{m}$.

Em [23], foi realizado um estudo com um *taper* entre uma guia de onda de SOI de grande porte e uma fibra monomodo. Para compactar o *taper*, o comprimento de cada célula é definido em $[0, 20] \mu\text{m}$. O comprimento total do dispositivo é ajustado para $10 \mu\text{m}$. Foram alcançadas eficiências de transmissão com valores de $93,30\%$. O *taper* é segmentado em várias seções para aplicar a otimização. Um algoritmo de recozimento simulado ou *Simulated Annealing* (SA) é adotado para melhorar o AG. Três formas de codificação e

uma estratégia de otimização de dois passos foram adotados no processo de otimização. As tolerâncias nas direções horizontal e vertical foram investigadas através do algoritmo EME 3D, indicando que o *taper* otimizado é compatível com a tecnologia de processamento do circuito integrado. No processo de otimização, a eficiência de acoplamento é usada como função objetivo do AG. Foi utilizado o comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$.

Em [10] e [11] foi utilizado o BPM, através dessa técnica é possível investigar o fenômeno da propagação da luz em guias de ondas ópticos e gerar gráficos para representar tal propagação, o que certamente irá orientar o projetista no desenvolvimento do seu trabalho.

Em [11], [14], [15] e [22] foi utilizado o FDTD, ele apresentou resultados satisfatórios na solução dos problemas propostos e trata-se de uma técnica em que é possível analisar numericamente o comportamento de problemas eletromagnéticos e solucionar equações de *Maxwell*, que são discretizadas temporariamente e espacialmente. A cada iteração, equações são executadas pelo FDTD o que resultará na forma de onda no domínio do tempo.

Em [13], [14], [22] e [23], o algoritmo EME trata-se de uma técnica no domínio da frequência e possui uma dependência da decomposição dos campos eletromagnéticos para simular a propagação da luz. Após a resolução das equações de Maxwell, os modos próprios são encontrados nas seções transversais locais.

Em [19], o SIA usa conceitos dos sistemas imunológicos naturais para resolução de problemas de otimização. Trata-se um algoritmo de otimização que trabalha com o processo de reconhecimento de antígeno e na produção de anticorpos para cada possível antígeno, além de trabalhar com processos de seleção, clonagem e mutação.

Em [20], o algoritmo ED trabalha com soluções candidatas com o intuito de melhorá-las com base em uma medida de qualidade. Novas soluções são criadas com base na combinação de soluções existentes, tal combinação é definida por meio de fórmulas.

Em [19] e [23], AG é baseado na ideia de seleção natural. O conceito de evolução é usado para resolver problemas de otimização, ele explora regiões para direcionar melhor o processo de evolução, a ideia básica é que os indivíduos que possuam as melhores características sobrevivam por serem mais aptos e de forma contrária, os indivíduos que possuam menos aptidão sejam eliminados no decorrer do processo. O algoritmo trabalha com processos de seleção, cruzamento, mutação e elitismo.

Em [23], o SA é uma técnica para resolução de problemas de otimização que tem relação com o recozimento físico. Os parâmetros a serem otimizados estão relacionados com a configuração de partículas, um conjunto de temperaturas precisa ser definido através de um escalonamento de recozimento e para cada temperatura um tempo também precisa ser determinado. Os novos estados a serem gerados e selecionados precisam de uma regra

para acontecerem.

Observe que o SOI foi utilizado em [11], [13], [14], [16], [17], [18] e [23]. O SOI transformou-se em um poderoso material para estudos em componentes fotônicos, devido ao seu notável confinamento de luz e ao desenvolvimento da tecnologia de processamento de silício [14]. A fotônica de silício é apresentada como um meio promissor para futuras interligações ópticas de alta velocidade [40].

A fibra óptica apresenta um funcionamento melhor em algumas faixas de comprimento de onda. Tais comprimentos têm uma adaptação mais favorável às características de transmissão com as particularidades da fibra ótica, são eles $0,850\ \mu\text{m}$, $1,3\ \mu\text{m}$ e $1,55\ \mu\text{m}$, que são comprimentos de ondas típicos da transmissão óptica. Uma faixa de comprimento de onda está relacionada à uma janela de operação. Na segunda janela de transmissão $1,31\ \mu\text{m}$, ocorre a dispersão zero, em uma fibra padrão. Já na terceira janela de transmissão $1,55\ \mu\text{m}$, a atenuação é menor que na segunda janela, o ideal seria que as características de dispersão zero fossem associadas a uma baixa atenuação. No início dos anos 80, a escolha entre a dispersão zero a $1,3\ \mu\text{m}$ e perda mínima a $1,55\ \mu\text{m}$ era uma dúvida a ser enfrentada pelos projetistas de sistemas. Dessa forma, existia uma dedicação para produzir uma fibra, na qual o mínimo de dispersão ($D = 0$) supera com o mínimo de atenuação na terceira janela de transmissão [41-42]. Observe que o comprimento de onda de $1,55\ \mu\text{m}$ foi utilizado nas pesquisas realizadas de forma considerável.

2.2.1 Detalhes sobre MEF e PMLs

Para projeto de guias de ondas, ferramentas computacionais, que sejam capazes de simular e modelar, são fundamentais para execução promissora da otimização de guias de ondas ópticos [43]. Uma diversidade de métodos numéricos e teóricos pode ser usada para analisar a propagação das ondas em um meio. Para resolução de equações diferenciais, o tratamento numérico possui vantagens em relação aos métodos analíticos [44].

Vários fatores podem ser examinados ao se considerar uma redução na potência da onda, no momento em que há a propagação da luz. Analisar as perdas de potência do guia de ondas tem uma importância fundamental para projetar os guias de onda. Um dos fatores que causa perda de potência a partir de um guia de ondas óptico é a radiação, causada por uma mudança na direção do guia de onda. Isso pode gerar uma alteração da onda e mudança no ângulo de incidência em relação à frente de onda e os limites dos guias de onda. Em geral, com a dissipação de potência resultará em perda de informação, por isso é de extrema importância considerar a perda de potência no guia de ondas para projeto e análise dos guias [44].

O MEF (Método de Elementos Finitos), conhecido como uma ferramenta de análise de estruturas, é aplicado a uma enorme variedade de problemas, é um método flexível e

adequado para resolução de equações diferenciais parciais e problemas eletromagnéticos, trata-se de uma técnica eficiente para o gerenciamento de ondas ópticas [43-46]. Além de possuir a vantagem de ser aplicado em regiões não uniformes e de configurações não regulares. Sendo assim, em regiões com instabilidade ou alta intensidade do campo eletromagnético, é possível uma avaliação mais detalhada da malha que envolve tais regiões [47].

O MEF trata-se de um procedimento numérico, onde uma estrutura é dividida em elementos finitos e esses pequenos pedaços de estrutura são reconectados através de nós para mantê-los unidos. Uma malha poderá mesclar elementos de formas, tipos e propriedades físicas diferentes. Programas de geração de malha, chamados pré-processadores gráficos auxiliam o usuário nessa tarefa de divisão. O processo irá gerar um conjunto de equações algébricas que estarão relacionadas aos elementos e essas serão resolvidas por meio de um computador digital. A solução dessas equações, responsáveis por representar os fenômenos físicos envolvidos, será gerada pelas simulações. As equações diferenciais parciais irão atuar em um domínio espacial e esse é, muitas vezes, discretizado como malha. Para cada elemento criado, deverão ser associadas propriedades e programas de pós-processamento gráficos, que irão gerar e exibir as saídas, de acordo com as escolhas do usuário [45,46].

Para definir os campos eletromagnéticos em qualquer região, é necessária a resolução das equações de campo de Maxwell em um sistema de coordenadas adequado para a região. O campo eletromagnético é representado matematicamente dentro de uma região através de uma superposição de modos ou tipos de ondas [48].

Em guias de onda, as características da excitação do campo e as dimensões nessas regiões induzem a que apenas um modo seja capaz de propagação. Como consequência, muito frequentemente, o campo eletromagnético é descrito pelas amplitudes desse tipo de onda dominante [48].

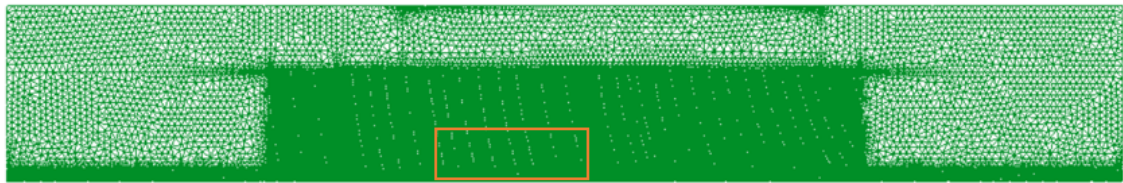
A camada perfeitamente casada ou *Perfectly Matched Layer* (PML) foi primeiramente formulada por Berenger, 1994 [49]. A PML trata-se de uma condição de contorno de fronteira capaz de absorver as reflexões indesejáveis [50-51], uma solução para métodos dedicados à análise da propagação da onda eletromagnética, uma vez que os recursos computacionais para testes dos problemas são onerosos ao se considerar o tempo, por isso uma adaptação do espaço computacional através de condições de contorno seria essencial. A ideia seria evitar reflexões da onda propagante, ao alcançar os limites do domínio onde o fenômeno físico ocorre [52]. Dentro do algoritmo interno são as PMLs são utilizadas como artifícios para limitar o tamanho da simulação e tornar o processamento mais rápido.

PMLs são camadas absorventes, que podem ter características de materiais que proporcionam reflexão zero, em hipótese. A finalidade da PML é evitar reflexões de

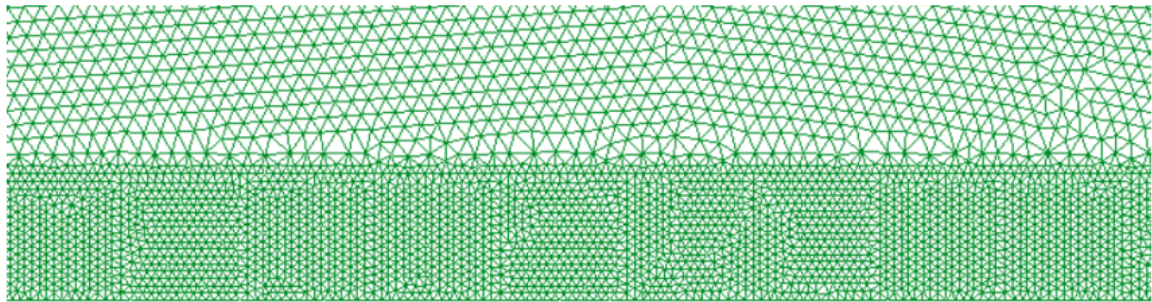
ondas de saída que alcancem os limites imaginários [53].

Estruturas de alto contraste possibilitam o projeto de componentes de guias de onda, que podem constituir ligações complexas dentro de uma pequena área, devido à característica de forte confinamento de luz [54]. Levando em consideração que um alto contraste de índice de refração pode resultar em reflexão, foram adicionadas camadas absorventes (PMLs) como condições de limitação para a estrutura [14].

A Figura 2.2(a) representa a malha com 148.535 elementos de triângulos e 299.112 nós.



(a)



(b)

Figura 2.2: Representação da malha, (b) Ampliação da região marcada na Figura 2.2(a).

Capítulo 3

ALGORITMO DE COLÔNIA DE FORMIGAS (ACF)

3.1 Introdução

A técnica de otimização por colônia de formigas foi proposta pela primeira vez por M. Dorigo em [55,56], nos anos 90. O algoritmo trata-se de uma simulação do comportamento das formigas reais em busca de alimentos e a forma como a colônia de formigas se organiza é tão estruturada, que juntas elas são capazes de solucionar tarefas complexas, uma vez que a preocupação é na sobrevivência da colônia e não apenas da sobrevivência individual. Tal comportamento foi observado e utilizado para resolver problemas complexos de otimização [57]. A resolução de problemas de otimização é importante tanto para o mundo científico como para o mundo industrial, e a comunidade científica tem solucionado muitos destes problemas através do uso de algoritmos inspirados na natureza [58].

Na Figura 3.1 encontra-se a representação do comportamento das formigas em busca de alimentos, adaptado de [59]. Estão simbolizados o ninho das formigas, uma fonte de alimentos, a distribuição das formigas e dois caminhos possíveis (Caminho A e Caminho B). Os caminhos possuem tamanhos diferentes, o caminho A é mais curto e o caminho B é mais longo [59].

Na Figura 3.1, no tempo $t = 0$, um total de 6 formigas foram inseridas no sistema. Inicialmente, o caminho a ser selecionado por esses agentes é aleatório. O objetivo é sair do ninho, buscar e obter o alimento e retornar ao ninho. Do total de agentes, 3 deles escolherá o caminho A (caminho mais curto) e 3 deles escolherá o caminho B (caminho mais longo) [59].

No tempo $t = 1$, as 3 formigas que fizeram a escolha pelo caminho A (caminho mais curto) já conseguiram chegar à fonte de alimentos. O caminho percorrido por estas

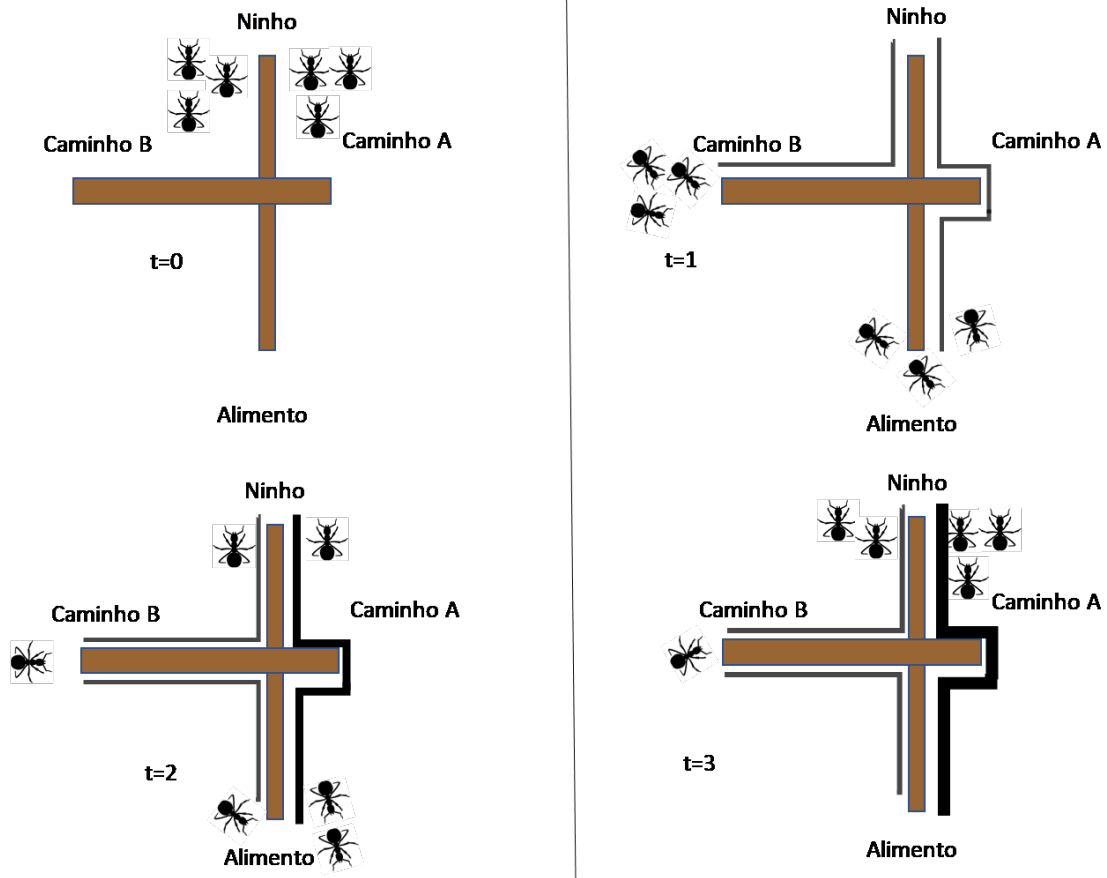


Figura 3.1: Esquemático do Comportamento das formigas em busca de alimentos. Adaptado de [59].

formigas está representado pela linha de cor cinza na Figura 3.1, que vai do ninho até a fonte de alimento. Já as outras 3 formigas que fizeram a escolha pelo caminho B (caminho mais longo) ainda não conseguiram chegar à fonte de alimentos e estão no meio do caminho B, esse percurso está representado pela linha de cor cinza que vai do ninho até parte do caminho B [59]. As linhas desenhadas em torno dos caminhos representam o depósito de feromônio, substância depositada pelas formigas.

No tempo $t = 2$, das 3 formigas que tinham feito a escolha pelo caminho A (caminho mais curto), duas delas já retornaram para o ninho, esse percurso está representado pela linha de cor preta com mais destaque em $t=2$, que vai da fonte de alimento até o ninho, e uma delas retornou da fonte de alimento pelo caminho B e ficou perdida do seu bando de formigas inicial, esse percurso está representado pela linha de cor cinza, que vai da fonte de alimentos até parte do percurso B [59]. Já existem traços de feromônio depositados no caminho B pelas formigas, que passaram anteriormente por esse caminho, por esse motivo a formiga, que se perdeu do bando inicial, ainda que em uma quantidade mínima de feromônio presente no percurso maior, segue o caminho B.

Devido à existência de feromônio no caminho A, existe uma maior probabilidade de as formigas seguirem esse caminho, como consequência das 3 formigas que chegaram à fonte de alimentos através do caminho A, para retornarem ao ninho após a conquista de alimentos, duas formigas fizeram a seleção pelo caminho A e uma delas selecionou o caminho B, onde a quantidade de feromônio é mais fraca em relação ao caminho A, embora com uma concentração menor de substância, ela existe e pode influenciar no direcionamento da formiga. A formiga que selecionou o caminho B (caminho mais longo), ainda está no meio do percurso do caminho B, já as formigas, que selecionaram o caminho A (caminho mais curto), já se encontram no ninho. Enquanto as outras 3 formigas que escolheram o caminho B (caminho mais longo), conseguiram chegar após uma unidade de tempo, em relação às formigas que seguiram pelo caminho A. As 3 formigas que fizeram a escolha pelo caminho B estão desenhadas no local da fonte de alimentos [59].

No tempo $t = 3$, as formigas que estavam seguindo o caminho B (caminho mais longo) retornaram ao ninho por meio do caminho A ou B. Finalmente, todas as formigas (as que partiram do caminho A e B) retornaram ao ninho, com exceção de uma das formigas que tinha iniciado pelo caminho B [59]. O caminho em que foi depositada uma maior quantidade de feromônio está com uma linha de cor preta com mais intensidade em relação aos períodos anteriores. O caminho A possui uma maior quantidade de feromônio depositada sobre ele (a intensidade está representada pela escuridão do caminho, que vai do ninho até a fonte de alimentos e da fonte de alimentos até o ninho), por isso foi percorrido mais vezes em relação ao caminho B [59].

O modelo ilustrou uma ideia de como a colônia de formigas faz para determinar o caminho mais curto em busca de alimento e também é possível observar que em caminhos, que não são utilizados com maior frequência, ocorre uma queda na quantidade de feromônio, o que também ajuda as formigas a encontrar o caminho mais curto, já que a substância em menor quantidade não torna atrativo o caminho. As formigas, em geral, exploram os caminhos com maior concentração de feromônio, mas existem formigas que fogem à regra e exploram novos caminhos, isso ajuda e muito a evitar a estagnação do algoritmo [59]. Formigas soltam feromônio e esse feromônio se dissipa com o tempo, logo onde houver mais formigas transitando, haverá mais feromônio e a tendência é que a maioria percorra o caminho com mais feromônio. No caso da implementação realizada, para cada coluna da matriz de feromônio, uma determinada quantidade de feromônio é aplicada, a classificação das colunas é dada de forma sequencial, em termos de valores de eficiência de acoplamento.

Ao realizarem um deslocamento fora do ninho, as formigas fazem depósito de uma substância denominada feromônio nos caminhos percorridos. A escolha do caminho é feita de acordo com a concentração de feromônio depositada no caminho. Ao encontrar

algum alimento, a qualidade desse recurso é avaliada e após essa avaliação o alimento é transportado para o ninho. A escolha do caminho pela formiga, para atingir o alimento, dependerá das probabilidades calculadas por cada caminho contendo a concentração de feromônio, quanto mais formigas andarem por esse caminho, maior a concentração de feromônio no mesmo. Em similaridade, o algoritmo baseado nesse comportamento das formigas, busca as semelhanças existentes entre as formigas reais e artificiais e faz as correspondências necessárias [58].

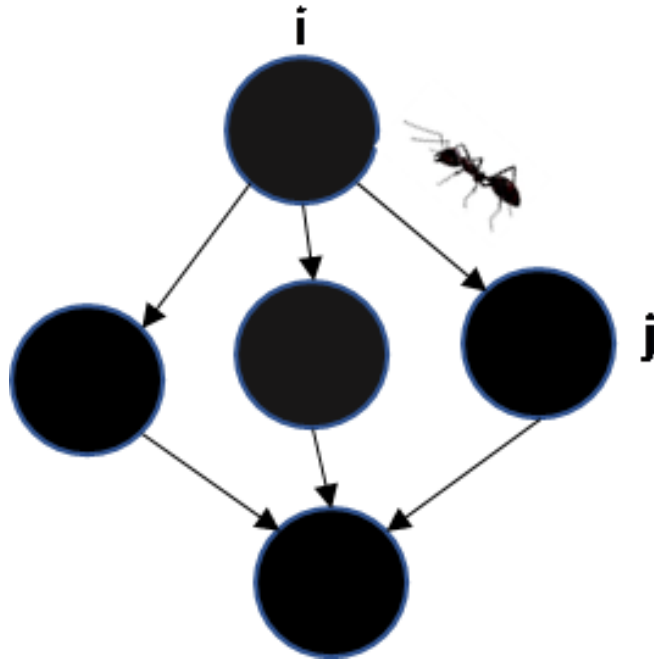


Figura 3.2: Grafo representando a escolha da formiga por uma determinada aresta ij .

Para escolher uma determinada aresta ij com origem em um nó i e destino no nó j , as formigas seguirão a regra a seguir [60-62]:

$$p_{i,j} = \frac{\tau(i,j)^\alpha \eta(i,j)^\beta}{\sum_{j \in N} \tau(i,j)^\alpha \eta(i,j)^\beta} \quad (3.1)$$

onde $\tau(i,j)$ é a quantidade de feromônio presente em uma determinada aresta. O $\eta(i,j)$ está associado às propriedades envolvendo os recursos que se objetiva encontrar, essa informação estará relacionada ao problema envolvido, trata-se de uma informação heurística. Já os parâmetros α e β capazes de controlar a influência de $\tau(i,j)$ e $\eta(i,j)$, respectivamente, eles irão ajustar o quão dominantes são $\tau(i,j)$ e $\eta(i,j)$ para o problema específico. Já o N é um conjunto que está relacionado com a vizinhança do nó i , em N está contido os possíveis nós j de destino. Quanto maiores forem os valores de $\tau(i,j)$ e $\eta(i,j)$, maior a possibilidade de escolher a aresta relacionada. E $p_{i,j}$ trata-se da probabilidade de escolher determinada aresta ij [60-62].

Supondo um modelo onde um grafo $G = (V, E)$, onde V é composto por n nós, dos quais um dos nós representa o ninho e os demais nós representam os alimentos, e E é composto por n arestas, as quais são as ligações entre o ninho e cada fonte de alimento. A probabilidade para cada formiga escolher um determinado caminho está relacionada à concentração de feromônio depositada em cada caminho [58], e é dada por:

$$P_i = \frac{C_i}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots}, i = 1, 2, 3... \quad (3.2)$$

Onde P_i é a probabilidade de escolher o caminho i e C_i é concentração de feromônio no caminho i . Sendo que cada C_i é equivalente a $\tau(i, j)$.

Um dos padrões que chamam muita atenção dos pesquisadores é a capacidade que as formigas possuem em se organizar e encontrar caminhos mais curtos, situação possibilitada através da comunicação mediada por modificações do meio ambiente, por exemplo, as marcas no chão deixadas por formigas ao depositarem um produto químico, elevam a probabilidade das outras formigas seguirem o mesmo caminho descoberto por formigas que fizeram o mesmo trajeto anteriormente [63].

A intensidade de feromônio presente no caminho é proporcional à sua utilidade para construção de boas soluções de cada caminho avaliado pelas formigas. Através de uma política de decisão, uma solução para o problema é construída por cada formiga, partindo do nó de origem em direção ao nó de destino. São armazenadas informações lidas pela formiga e usadas de forma estocástica para decidir como será o próximo deslocamento [63].

A evaporação do feromônio é dada da seguinte forma [58]:

$$C_i \leftarrow (1 - r)C_i, i = 1, 2, 3... \quad (3.3)$$

A evaporação do feromônio é controlada pelo parâmetro r , fator de evaporação, em uma determinada aresta i , onde $r \in (0, 1]$. Dessa forma, o feromônio vai sofrendo evaporação de acordo com o parâmetro r a ser aplicado [58].

As formigas organizam-se de forma probabilística, com base em informações locais e podem encontrar os melhores caminhos entre o ninho e a fonte de alimento [63].

Existe o mecanismo de evaporação em colônias de formigas reais, mas tal fator não desempenha um papel tão importante para descoberta de caminhos mais curtos como em formigas artificiais, que trabalham com problemas de otimização, que envolvem tarefas mais complexas, do que formigas reais podem resolver. A evaporação favorece o esquecimento de escolhas ruins ou erros feitos no passado, dessa forma torna-se um procedimento essencial para formigas artificiais. A evaporação do feromônio é uma forma de evitar convergência rápida de todas as formigas para um caminho subótimo, fator que favorece a exploração de caminhos diferentes durante o processo de busca [63].

O ACF pode ser resumido por meio de três estratégias: construção de soluções, *daemon actions* e atualização de feromônios [64].

Construção de Soluções: nesta etapa são implementadas as rotinas para que as formigas possam construir as soluções, além de como serão utilizadas as regras para decisão de qual caminho deva ser seguido, de acordo com as informações heurísticas e influência do feromônio existente no caminho [64].

Daemon Actions: ações que podem melhorar o desempenho do algoritmo ACF, uma das ações que podem ser exemplificadas é a busca local. O procedimento objetiva melhorar a qualidade dos resultados ao usar informações coletadas por formigas. Trata-se de um procedimento de uso opcional, mas que pode ser muito útil no resultado final [64,65].

Atualização de Feromônio: os valores dos feromônios são atualizados com a finalidade de controlar as escolhas realizadas pelas formigas e evitar que decisões insatisfatórias sejam esquecidas e reforçar boas decisões [64].

Em geral, o algoritmo de colônia de formigas é aplicado para encontrar soluções através de grafos. Em condições naturais, as formigas espalham-se em direções aleatórias, a fim de buscar alimento para sua colônia e durante o percurso, quantidades de feromônio são depositadas pela trilha, a fim de demarcar vestígios, assim como promover a comunicação entre as formigas, o que leva outras formigas a seguirem o mesmo caminho em busca de alimento. O feromônio passa a ser evaporado ao longo do tempo indicando que o alimento está muito distante e/ou poucas formigas seguiram por determinados caminhos, reduzindo a atração entre a população de formigas, tal evaporação evita a convergência para uma solução ótima localmente.

Formigas liberam feromônio e esse feromônio se dissipa com o tempo, logo onde houver mais formigas transitando haverá mais feromônio e a tendência é que a maioria percorra o caminho com mais feromônio, por ser o mais curto ou o que leva ao melhor alimento.

3.2 Detalhes da Implementação do ACF

Inicialmente uma determinada quantidade de formigas é distribuída pelo espaço de busca, tal quantidade é igual ao tamanho da população ou tamanho da colônia. Em seguida, cada formiga pegará um caminho aleatório até um alimento, sendo cada uma responsável por pegar 15 comprimentos de segmentos e cada conjunto desses 15 comprimentos será equivalente a um caminho até um alimento, ou seja, a formiga tem a responsabilidade de formar um caminho e maximizar a potência através desse caminho escolhido. Inicialmente todos os caminhos (caminho do ninho para o alimento) têm a

mesma probabilidade, não há feromônio ainda, por isso elas são distribuídas aleatoriamente. Os caminhos percorridos pelas formigas serão avaliados através de uma função de *fitness* ou função de aptidão, no momento em que as formigas associadas a cada caminho chegarem à fonte de alimento. Após realizada a avaliação, as formigas retornarão ao ninho e os caminhos associados às melhores eficiências de acoplamento serão reforçados através da intensificação de feromônio e salvos na memória, representada pelo ninho. Cada formiga se move através do espaço de soluções, verificando as potenciais soluções para o problema e decide o melhor rumo a seguir de acordo com a solução que trará a eficiência máxima. Depois de um ou mais caminhos cada formiga alcança uma eficiência distinta. A probabilidade de escolher determinado caminho é proporcional à eficiência de acoplamento relacionada à contribuição que cada configuração de *taper* fornece.

Ao considerar uma população de 10 formigas, isso resultará em uma matriz de 15×10 , ou seja, 15 linhas representando os comprimentos dos segmentos e 10 colunas representando as formigas. Como está representado na Equação 3.4.

$$M = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} & a_{1,6} & a_{1,7} & a_{1,8} & a_{1,9} & a_{1,10} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} & a_{2,6} & a_{2,7} & a_{2,8} & a_{2,9} & a_{2,10} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} & a_{3,6} & a_{3,7} & a_{3,8} & a_{3,9} & a_{3,10} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} & a_{4,5} & a_{4,6} & a_{4,7} & a_{4,8} & a_{4,9} & a_{4,10} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} & a_{5,4} & a_{5,5} & a_{5,6} & a_{5,7} & a_{5,8} & a_{5,9} & a_{5,10} \\ a_{6,1} & a_{6,2} & a_{6,3} & a_{6,4} & a_{6,5} & a_{6,6} & a_{6,7} & a_{6,8} & a_{6,9} & a_{6,10} \\ a_{7,1} & a_{7,2} & a_{7,3} & a_{7,4} & a_{7,5} & a_{7,6} & a_{7,7} & a_{7,8} & a_{7,9} & a_{7,10} \\ a_{8,1} & a_{8,2} & a_{8,3} & a_{8,4} & a_{8,5} & a_{8,6} & a_{8,7} & a_{8,8} & a_{8,9} & a_{8,10} \\ a_{9,1} & a_{9,2} & a_{9,3} & a_{9,4} & a_{9,5} & a_{9,6} & a_{9,7} & a_{9,8} & a_{9,9} & a_{9,10} \\ a_{10,1} & a_{10,2} & a_{10,3} & a_{10,4} & a_{10,5} & a_{10,6} & a_{10,7} & a_{10,8} & a_{10,9} & a_{10,10} \\ a_{11,1} & a_{11,2} & a_{11,3} & a_{11,4} & a_{11,5} & a_{11,6} & a_{11,7} & a_{11,8} & a_{11,9} & a_{11,10} \\ a_{12,1} & a_{12,2} & a_{12,3} & a_{12,4} & a_{12,5} & a_{12,6} & a_{12,7} & a_{12,8} & a_{12,9} & a_{12,10} \\ a_{13,1} & a_{13,2} & a_{13,3} & a_{13,4} & a_{13,5} & a_{13,6} & a_{13,7} & a_{13,8} & a_{13,9} & a_{13,10} \\ a_{14,1} & a_{14,2} & a_{14,3} & a_{14,4} & a_{14,5} & a_{14,6} & a_{14,7} & a_{14,8} & a_{14,9} & a_{14,10} \\ a_{15,1} & a_{15,2} & a_{15,3} & a_{15,4} & a_{15,5} & a_{15,6} & a_{15,7} & a_{15,8} & a_{15,9} & a_{15,10} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Inicialmente, como as formigas serão espalhadas aleatoriamente no espaço de busca e cada formiga será responsável por agrupar 15 comprimentos de segmentos, a quantidade de modos distintos que cada formiga poderá escolher um agrupamento de 15 elementos (comprimentos de segmentos) entre 150 elementos será fornecida por meio da combinação de 150 elementos tomados 15 a 15.

$$C_{150,15} = \frac{150!}{15!(150-15)!} = 1,6239 \times 10^{20} \text{ modos distintos} \quad (3.5)$$

No algoritmo implementado inspirado no comportamento da colônia de formigas, as formigas são responsáveis pela busca de soluções ótimas, que no caso são os caminhos que maximizam as eficiências de acoplamento, e vão armazenando no ninho para as próximas gerações. O agente da ação será a formiga, a protagonista, que será responsável por buscar soluções e agrupá-las. As soluções foram representadas com um conjunto de números reais, e as formigas são responsáveis por agrupar 15 comprimentos dos segmentos do *taper* ou solução. A otimização é realizada alterando os comprimentos dos segmentos do dispositivo, através de estratégias que envolvem variação na intensidade do feromônio. A alteração de parâmetros tem uma forte influência no comportamento do algoritmo implementado, ou seja, as soluções podem ser modificadas com a mudança dos parâmetros definidos na implementação, por exemplo, parâmetros como o tamanho da população e intensidade de feromônio a ser evaporada.

A concentração de feromônio utilizada é alterada dinamicamente, de acordo com a eficiência de acoplamento que cada *taper* fornece. Dessa forma é possível influenciar a orientação da formiga, utilizando tal condição, para que não haja um descontrole tanto no depósito de feromônio como na evaporação, evitando que as formigas sigam para um mesmo caminho e leve a um comportamento de estagnação. No início da otimização, a distribuição de feromônio deve ser zero e a alocação de feromônio tem de ser proporcional à avaliação dos caminhos até o alimento e consequentemente das formigas, já que formigas, caminhos e alimentos estão diretamente relacionados.

A decisão de uma formiga atravessar determinado caminho está relacionada à quantidade de feromônio presente em cada configuração de *taper*. O caminho é selecionado de acordo com o valor da eficiência de acoplamento. O melhor caminho vai sendo atualizado de acordo com os resultados obtidos durante o processo. Diversas possibilidades de caminhos são apresentadas para cada formiga, a todo o momento. As formigas são responsáveis por construir soluções, cada movimento realizado por elas gera uma nova solução. A informação do feromônio servirá para orientar outras formigas em seu deslocamento.

O comportamento de cada formiga é alterado de forma dinâmica ao ser orientada pelo depósito de feromônio. O feromônio está diretamente relacionado com a distribuição de probabilidades. Os comprimentos dos segmentos do *taper* encontradas sofrerão uma variação de acordo com a escolha que cada formiga faz, resultando em configurações diferentes de cada *taper*.

O feromônio é atualizado de forma global, de acordo com o melhor caminho escolhido atualmente. A busca tem de ser realizada até completar o critério de parada do algoritmo, ou seja, a quantidade de gerações, que foi definida como 200 gerações.

A Figura 3.3 representa um modelo da possibilidade de escolha das formigas na

busca por máximas eficiências de acoplamento. Estão sendo simbolizadas, formigas no ninho, os caminhos possíveis que estão representados pelo conjunto de comprimentos de segmentos (elementos do vetor a_i) com suas cores associadas às formigas, além das fontes de alimentos que representam as eficiências de acoplamento associadas aos caminhos. As formigas, os caminhos e as fontes estão relacionadas através da cor, por exemplo, a formiga sinalizada com a cor vermelha será responsável por agrupar 15 comprimentos de segmentos representados com a cor vermelha, tal agrupamento irá gerar um caminho que desencadeará na fonte com a cor vermelha, o mesmo ocorre para as outras cores. A Figura 3.3 é apenas uma representação de uma das possibilidades de caminhos que cada formiga poderá percorrer, a mesma formiga poderá percorrer quaisquer outros caminhos no espaço de busca, com tanto que cada formiga agrupe necessariamente um conjunto de 15 comprimentos de segmentos.

Ninho	Caminhos										Fontes de Alimento
	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$	$a_{1,4}$	$a_{1,5}$	$a_{1,6}$	$a_{1,7}$	$a_{1,8}$	$a_{1,9}$	$a_{1,10}$	Fonte 9
	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$	$a_{2,4}$	$a_{2,5}$	$a_{2,6}$	$a_{2,7}$	$a_{2,8}$	$a_{2,9}$	$a_{2,10}$	Fonte 10
	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$	$a_{3,6}$	$a_{3,7}$	$a_{3,8}$	$a_{3,9}$	$a_{3,10}$	Fonte 6
	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$	$a_{3,4}$	$a_{3,5}$	$a_{3,6}$	$a_{3,7}$	$a_{3,8}$	$a_{3,9}$	$a_{3,10}$	
	$a_{5,1}$	$a_{5,2}$	$a_{5,3}$	$a_{5,4}$	$a_{5,5}$	$a_{5,6}$	$a_{5,7}$	$a_{5,8}$	$a_{5,9}$	$a_{5,10}$	Fonte 5
	$a_{5,1}$	$a_{5,2}$	$a_{5,3}$	$a_{5,4}$	$a_{5,5}$	$a_{5,6}$	$a_{5,7}$	$a_{5,8}$	$a_{5,9}$	$a_{5,10}$	
	$a_{7,1}$	$a_{7,2}$	$a_{7,3}$	$a_{7,4}$	$a_{7,5}$	$a_{7,6}$	$a_{7,7}$	$a_{7,8}$	$a_{7,9}$	$a_{7,10}$	Fonte 3
	$a_{7,1}$	$a_{7,2}$	$a_{7,3}$	$a_{7,4}$	$a_{7,5}$	$a_{7,6}$	$a_{7,7}$	$a_{7,8}$	$a_{7,9}$	$a_{7,10}$	
	$a_{9,1}$	$a_{9,2}$	$a_{9,3}$	$a_{9,4}$	$a_{9,5}$	$a_{9,6}$	$a_{9,7}$	$a_{9,8}$	$a_{9,9}$	$a_{9,10}$	Fonte 1
	$a_{9,1}$	$a_{9,2}$	$a_{9,3}$	$a_{9,4}$	$a_{9,5}$	$a_{9,6}$	$a_{9,7}$	$a_{9,8}$	$a_{9,9}$	$a_{9,10}$	
	$a_{11,1}$	$a_{11,2}$	$a_{11,3}$	$a_{11,4}$	$a_{11,5}$	$a_{11,6}$	$a_{11,7}$	$a_{11,8}$	$a_{11,9}$	$a_{11,10}$	Fonte 7
	$a_{11,1}$	$a_{11,2}$	$a_{11,3}$	$a_{11,4}$	$a_{11,5}$	$a_{11,6}$	$a_{11,7}$	$a_{11,8}$	$a_{11,9}$	$a_{11,10}$	
	$a_{13,1}$	$a_{13,2}$	$a_{13,3}$	$a_{13,4}$	$a_{13,5}$	$a_{13,6}$	$a_{13,7}$	$a_{13,8}$	$a_{13,9}$	$a_{13,10}$	Fonte 2
	$a_{14,1}$	$a_{14,2}$	$a_{14,3}$	$a_{14,4}$	$a_{14,5}$	$a_{14,6}$	$a_{14,7}$	$a_{14,8}$	$a_{14,9}$	$a_{14,10}$	Fonte 4
	$a_{15,1}$	$a_{15,2}$	$a_{15,3}$	$a_{15,4}$	$a_{15,5}$	$a_{15,6}$	$a_{15,7}$	$a_{15,8}$	$a_{15,9}$	$a_{15,10}$	Fonte 8

Figura 3.3: Esquemático do comportamento da formiga no espaço de busca na seleção do alimento.

Para exemplificar, na Figura 3.3, um total de 10 formigas são inseridas no sistema. O objetivo das formigas é sair do ninho, buscar e obter o alimento e retornar ao ninho. Inicialmente o caminho a ser selecionado é aleatório e a concentração inicial de feromônio é zero. As 10 formigas saem em busca de alimento e cada formiga segue um caminho, um possível agrupamento de comprimentos de segmento do *taper*. Após completar o percurso, cada formiga consegue alcançar um alimento (eficiência) e os melhores caminhos

(estruturas) são reforçados por feromônio. Os alimentos associados aos caminhos serão armazenados pela formiga no ninho e passarão por um processo de evaporação de feromônio, de acordo com a eficiência de acoplamento encontrada por cada estrutura, tal evaporação irá acontecer na relação inversa do valor da eficiência de acoplamento, ou seja, quanto maior a eficiência de acoplamento menor será a evaporação aplicada ao caminho, e conseqüentemente menos comprimentos de segmentos da estrutura inicial serão modificadas. A Figura 3.4 mostra como essa técnica é utilizada através de um fluxograma.

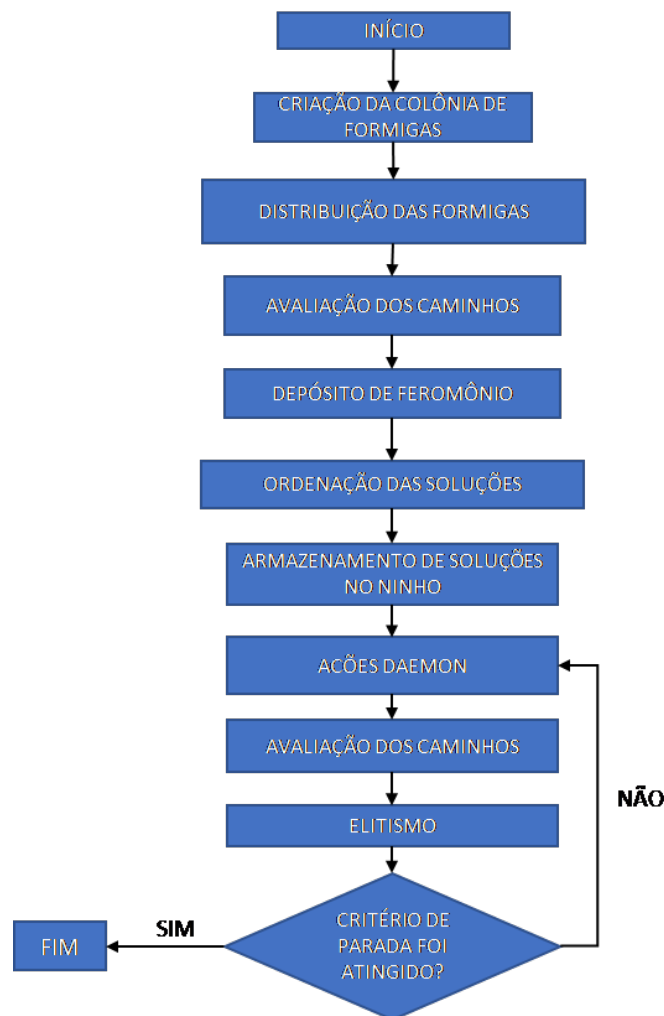


Figura 3.4: Fluxograma do algoritmo baseado em ACF.

Neste trabalho foi utilizada uma colônia com 10 formigas, sendo que cada formiga é responsável pelo agrupamento de 15 comprimentos de segmentos, que constituem uma configuração de *taper* diferente. Para cada caminho será aplicado uma taxa de feromônio proporcional à avaliação do caminho que ela seguiu até o alimento. A taxa de feromônio aplicada será inversamente proporcional à eficiência de acoplamento de cada caminho ou *taper*.

As etapas realizadas do algoritmo proposto estão representadas graficamente na Figura 3.4. Na etapa da criação da colônia de formigas, foram definidas variáveis para representar as formigas artificiais, foram geradas variáveis capazes de agrupar 15 comprimentos de segmentos. Cada formiga constrói uma solução, que se trata de um caminho, as soluções são avaliadas e ocorre uma atualização global de feromônio, de acordo com a avaliação realizada anteriormente e com a qualidade da solução relacionada. Em seguida, as soluções ou caminhos são ordenados em ordem decrescente, de acordo com o seu valor de eficiência de acoplamento, ou medida de *fitness*, que indicará o quão cada formiga está mais adequada ao problema e o quão apta está para continuar nas próximas gerações.

Na etapa de elitismo, as formigas mais aptas são colocadas no topo e as menos aptas em posições inferiores, são selecionadas 2 das melhores formigas avaliadas para irem para a próxima geração.

Por exemplo, considere as Figuras 3.5 e 3.6, são apresentadas as ações Daemon para a evaporação de feromônio menos intensa e mais intensa, respectivamente.

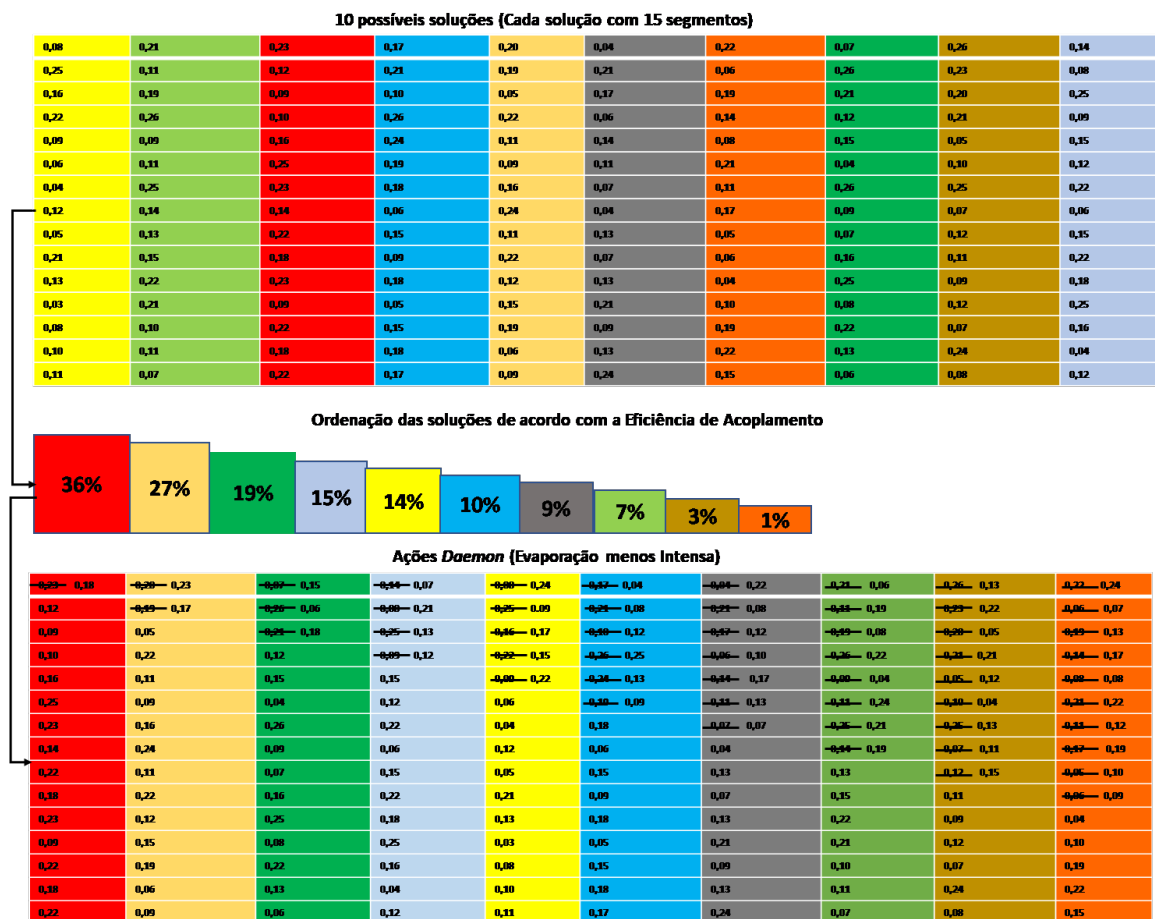


Figura 3.5: Ações *Daemon* para a evaporação de feromônio menos intensa.

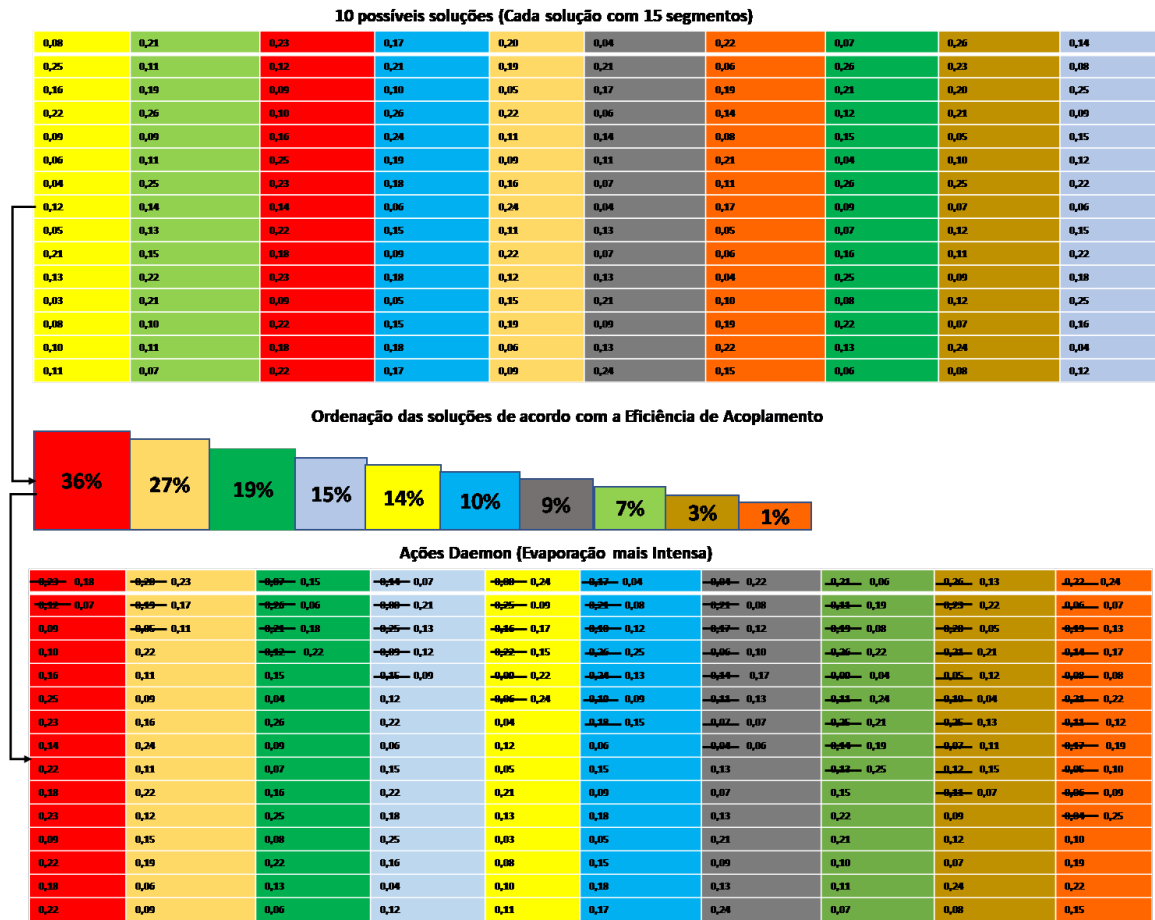


Figura 3.6: Ações *Daemon* para a evaporação de feromônio mais intensa.

Nas Figuras 3.5 e 3.6 considere que tenha sido feita uma ordenação com as eficiências de acoplamento alcançadas até um determinado momento, cada eficiência de acoplamento está relacionada a uma coluna da matriz de segmentos, e as colunas estão ordenadas de forma decrescente. Ao utilizar a evaporação menos intensa e uma quantidade de 10 colunas, cada coluna representando um conjunto de 15 segmentos, para a primeira coluna será alterado apenas 1 comprimento de segmento, para a segunda coluna: 2 comprimentos de segmentos, para a terceira coluna: 3 comprimentos de segmento, para a quarta coluna: 4 comprimentos de segmentos, para a quinta coluna: 5 comprimentos de segmentos, para a sexta coluna: 6 comprimentos de segmentos, para a sétima coluna: 7 comprimentos de segmentos, para a oitava coluna: 8 comprimentos de segmentos, para a nona coluna: 9 comprimentos de segmentos, para a décima coluna: 10 comprimentos de segmentos. Por outro lado, na evaporação mais intensa, sempre será alterado um segmento a mais em relação à evaporação menos intensa: por exemplo: na primeira coluna: 2 comprimentos de segmentos, na segunda coluna: 3 comprimentos de segmentos, na terceira coluna: 4 comprimentos de segmentos, na quarta coluna: 5 comprimentos de segmentos, na quinta coluna: 6 comprimentos de segmentos, na sétima coluna: 8 comprimentos de segmentos,

na oitava coluna: 9 comprimentos de segmentos, na nona coluna: 10 comprimentos de segmentos, na décima coluna: 11 comprimentos de segmentos. Serão geradas maiores alterações para os *tapers* que apresentarem menores eficiências e menores alterações para os *tapers* que apresentarem maiores eficiências, ou seja, uma relação inversa entre a eficiência de acoplamento e a quantidade de alterações realizadas nos comprimentos do segmento do *taper*. É importante enfatizar que as alterações podem ser realizadas em quaisquer dos 15 comprimentos de segmento de cada coluna, contanto que respeite a proporção relacionada à eficiência de acoplamento. Nas Figuras 3.5 e 3.6 estão sendo exemplificadas como funcionariam mudanças nos comprimentos dos segmentos, tais mudanças devem ser realizadas em comprimentos de segmentos aleatoriamente e não necessariamente seguindo uma sequência de acordo com ordem das posições.

Na etapa de ações *Daemon* são realizadas ações de diversificação, onde ocorre evaporação de feromônio nas estruturas, de acordo com a sua avaliação de eficiência de acoplamento. Foram escolhidas duas formas de evaporação do feromônio, uma delas a redução de feromônio é menos intensa e a outra é mais intensa. A redução de feromônio está associada a mudanças nos valores da geometria do *taper*. Nas evaporações menos intensas e mais intensas, as alterações ocorrem de forma a tentar preservar as melhores configurações e transformar as piores configurações, na evaporação mais intensa, tal modificação é na intenção de que as estruturas sofram mudanças capazes de gerar estruturas bem mais diferentes que na evaporação menos intensa.

A colônia de formigas simultaneamente visita fontes de alimentos e se movem usando um processo estocástico. De forma experimental, as formigas vão criando soluções e após a construção de soluções, as mesmas são avaliadas pelas formigas. Ocorre uma memorização dos comprimentos de segmentos no caminho de ida para que seja distribuída a quantidade de feromônio adequada.

A atualização dos feromônios é uma decisão de quanto feromônio será depositado ou reduzido no caminho pela formiga. Soluções boas produzidas pelas formigas serão usadas por formigas futuras. Nas ações *Daemon* são feitas coletas de informações globais para decidir se é necessário ou não depositar feromônio adicional e selecionar formigas, que construíram boas soluções, o que favorece a exploração de novas áreas do espaço de busca.

A Figura 3.7 representa o esquema o pseudocódigo do ACF. Inicialmente os parâmetros: número de gerações, tamanho da colônia de formigas, intensidade do feromônio a ser evaporada são inicializados. Também é inicializada a estrutura de dados que representa o *taper*, no caso trata-se de uma matriz de comprimentos de segmentos representada por números reais. Foi inserida uma condição de parada para o algoritmo, o algoritmo deve parar se a condição de parada foi alcançada e deve continuar caso contrário. Até que

todas as formigas construam soluções, os procedimentos de construção de soluções, de atualização de feromônio, avaliação da qualidade da solução, ações *Daemon* e atualização das soluções serão executados.

```
procedure ACF  
  
  Inicialize parâmetros  
  
  Inicialize estrutura de dados  
  
  while critério de parada não for atingido do  
  
    Posicione as formigas no espaço de busca  
  
    repeat  
  
      for i=1 to tamanho_colônia do  
  
        construa_solucao(i);  
  
        atualize_feromônio(i);  
  
        avalie_qualidade_solucao(i);  
  
        execute_ações_daemon(i);  
  
        avalie_qualidade_solução(i);  
  
        atualize_solução(i);  
  
      end for  
  
    until toda formiga tenha construído uma solução  
  
  end while  
  
end procedure
```

Figura 3.7: Pseudocódigo do algoritmo baseado em ACF.

Capítulo 4

ALGORITMO BUSCA DISPERSA (BD)

4.1 Introdução

A metaheurística busca dispersa ou busca por espalhamento (BD) também conhecida como *Scatter Search* (SS), trata-se de um método de busca populacional. O método foi descrito pela primeira vez por Glover, 1977. O método foi projetado para trabalhar em torno de um conjunto de referência, os elementos desse conjunto seriam o conjunto de possíveis soluções. Tais elementos passam por um processo de combinação objetivando melhorar a solução original. Entre os procedimentos que fazem parte do algoritmo BD está a geração de subconjunto, onde subconjuntos são gerados a partir do conjunto de referência. Além desse processo, existe outro procedimento que se trata da combinação de soluções, que é tratada de forma análoga ao operador *crossover* do AG, mas não é limitado a combinação de soluções dos pais, todas as soluções são participantes do processo de combinação no BD. A partir do conjunto de referência são selecionados subconjuntos de vários tipos para aplicação do processo de combinação, por exemplo: se for considerado um subconjunto do tipo 5, é introduzida a melhor solução em cada subconjunto de 5 soluções [66-71].

A BD tem apresentado bons resultados para problemas de otimização. A busca da BD é conduzida em relação a um conjunto de referência, que geralmente representa boas soluções alcançadas nos processos anteriores. O conjunto de referência é proveniente dos membros da população, o tamanho desse conjunto é pequeno em relação ao tamanho da população original [72]. As partes da BD podem ser implementadas em uma diversidade de formas e fases de processos refinadas, por isso trata-se de um algoritmo flexível [73].

O algoritmo BD é dividido em 5 métodos [73]:

1. Método de Geração de Diversificação: procedimento que cria um conjunto de soluções de teste, para posterior avaliação de suas características e qualidades, uma medida de distância entre as soluções pode ser definida, conforme problema a ser aplicado, a fim de maximizar a diversidade [73].
2. Método de Melhoria: a partir das soluções geradas anteriormente, ocorre uma modificação com a finalidade de refinar as soluções de teste [73]. Em [75] são apresentados 8 métodos de melhoria e cada um dos métodos apresenta um desempenho diferente. O método consiste em um processo de pesquisa local. O objetivo é transitar de uma solução para outra solução através de inserções ou remoções de um determinado elemento de uma posição para outra posição. Uma avaliação é realizada a cada movimento executado e através de uma comparação é possível analisar se o movimento foi favorável ou não para o problema em questão [76]. O método acelera a convergência para soluções ótimas. Existe um processo de verificação se a nova solução apresentada melhora a solução atual. As novas soluções recebidas serão verificadas no *loop* até que não haja mais soluções para se integrar ao processo de verificação. A solução considerada melhor até agora, substitui o pior no conjunto de referência [72].
3. Método de Atualização do Conjunto de Referência: o conjunto de referência é atualizado conforme a qualidade ou diversidade da solução. As melhores soluções do conjunto de referência são colocadas no início da lista, após processo de ordenação, conforme valor da função objetivo. A ideia é melhorar o valor da função objetivo, através da memorização das melhores soluções obtidas durante a pesquisa [73].
4. Método de Geração de Subconjuntos: o procedimento atua no conjunto de referência, a fim de gerar subconjuntos de tamanhos diferentes [73].
5. Método de Combinação de Solução: faz um agrupamento dos subconjuntos gerados anteriormente e é responsável pela geração de novas soluções. O método é semelhante ao cruzamento em AG, mas duas ou mais soluções podem ser combinadas [73,74].

O fator mais importante da BD concentra-se no conjunto de referência, ele deve ser bem construído, pois ele servirá como entrada para todos os procedimentos aplicados na BD. A estratégia de atualização dinâmica é de fundamental importância, pois realiza uma substituição de soluções que possuam um custo inferior por soluções de custo superior,

embora soluções não tão bem avaliadas em um determinado momento podem ser transformadas futuramente em boas soluções através do processo de combinação, eventualmente pode haver uma remoção de soluções promissoras, antes sem ao menos serem consideradas. De modo contrário, ao utilizar uma atualização estática, o conjunto de referência não é atualizado até que todas as combinações sejam finalizadas. Desta maneira, é recomendável testar combinações diversas ao utilizar o procedimento de atualização dinâmica, para alcançar melhores resultados [73].

No método de geração de subconjuntos, a abordagem para selecionar subconjuntos é por meio do tipo de subconjunto. Cada tipo de subconjunto estará relacionado ao tamanho que o subconjunto possui. As possibilidades de tipos de subconjuntos a serem criadas são [71,73]:

Subconjunto do Tipo 1: subconjuntos que possuem tamanho 2, ou seja, todas as possibilidades de 2 soluções pertencentes ao grupo de soluções [71, 73].

Subconjunto do Tipo 2: subconjuntos que possuem tamanho 3, ou seja, as possibilidades de 3 soluções pertencentes ao grupo de soluções, sendo que é necessário inserir a melhor solução entre as soluções do subconjunto de tamanho 2 [71,73].

Subconjunto do Tipo 3: subconjuntos que possuem tamanho 4, ou seja, as possibilidades de 3 soluções pertencentes ao grupo de soluções, sendo que é necessário inserir a melhor solução entre as soluções do subconjunto de tamanho 3 [71,73].

Subconjunto do Tipo 4: subconjuntos que possuem tamanho variando de 5 até o tamanho do conjunto de referência, considerando os melhores i elementos pertencentes ao grupo de soluções, sendo que i varia de 5 até o tamanho do conjunto de referência [71,73].

O conjunto de referência é gerado por boas soluções, que irão representar uma parcela da população inicial. Logo depois, a partir do conjunto de referência, um subconjunto é escolhido e as soluções decorrentes desse passam por um processo de combinação, que irá gerar novas soluções candidatas a um processo de melhoria e posteriormente o conjunto de referência é atualizado [72].

O algoritmo BD toma como base um conjunto de referência para construção de outras soluções, sendo que o tamanho desse conjunto não costuma ser maior do que 20 [74].

Inicialmente, o conjunto de referência é construído com metade do tamanho da população de soluções ($b/2$) melhores avaliadas do conjunto da população inicial do espaço de busca e com a outra metade de soluções diversas ($b/2$), sendo que essas são diferentes das melhores, sendo que o conjunto de referência é formado por b elementos, b trata-se do tamanho do conjunto de referência. A partir da população inicial gerada são constituídas duas novas populações para compor o conjunto de referência. As soluções com melhores avaliações e as soluções diversas são inseridas ao conjunto de referência e removidas da

população (P), que é gerada pelo método de geração de soluções diversas, trata-se do conjunto de soluções geradas por esse método, esse conjunto deve ser constituído por um número maior que o conjunto de referência, ou seja, maior que a quantidade de b elementos, máximo de 100 ou $5b$ [71]. A parcela com as soluções diversas está relacionada às soluções com o máximo das mínimas distâncias entre si. Tal parcela com $b/2$ soluções diversas são geradas pela distância que envolve as soluções da população P , a forma como tal distância será calculada está relacionada ao problema a ser resolvido, o objetivo é garantir a diversidade através da distância entre as soluções geradas [76].

Em oposição ao AG, a BD usa de forma reduzida o processo de randomização para a diversificação, a fim de buscar uma solução ótima. A BD trata-se de um algoritmo flexível, por permitir escolhas de implementação que facilitam a busca por soluções ótimas [74]. A evolução das soluções é gerada pela aplicação dos procedimentos de geração de subconjunto, combinação, melhoria e atualização [75].

A vantagem da BD está na questão da flexibilidade de cada um de seus procedimentos, um mesmo procedimento pode ser aplicado de formas diferentes, ele permite implementações alternativas [75], o que pode gerar uma enorme variedade de comportamento em termos de soluções.

O algoritmo SS faz parte da família da computação evolutiva e fundamenta-se no gerenciamento de uma população de soluções com o propósito de produzir novas soluções de teste, uma população de soluções é desenvolvida ao longo da pesquisa [76].

AG e BD são técnicas inspiradas em processos de evolução da natureza. Elas compartilham de características como: população, reprodução, gerações sucessivas. Enquanto o AG usa a aleatoriedade de forma intensa, a BD possui um comportamento mais direcionado, por exemplo, ao construir a população inicial de indivíduos na BD, é necessário seguir critérios de diversidade na população, já a geração da população inicial do algoritmo genético pode ser gerada aleatoriamente, sem seguir critérios pré-estabelecidos, somente as restrições inerentes ao problema. Há também na BD a questão da geração dos subconjuntos que representam as melhores soluções para o problema até o momento. A função de *fitness* usada na BD é análoga ao AG. Ao logo da execução, se surgirem soluções melhores que as soluções representadas por meio do conjunto de referência, elas substituem o conjunto de referência. A ideia básica é o melhoramento contínuo das soluções até então geradas e com isso o conjunto de referência é atualizado iterativamente [77].

O algoritmo de BD fundamenta-se em cinco processos básicos que podem ser executados de diversas maneiras, são eles: geração de diversificação, melhoria de solução, atualização do conjunto de referência, geração de subconjuntos e combinação de solução [78].

A ideia da BD é dividir o conjunto de soluções em dois outros grupos, um grupo de referência e outro de diversidade. O conjunto de diversidade teria a responsabilidade de representar o espaço de busca de forma mais justa. Esse conjunto é criado através de um procedimento denominado geração de diversidade, onde as soluções são selecionadas por meio de um processo de probabilidade, existirá uma relação inversa em relação a uma solução que já foi selecionada em um determinado intervalo, para evitar a geração de novas soluções muito semelhantes em relação às soluções já geradas anteriormente. Parte do conjunto de referência pode ser substituído por parte do conjunto de diversidade, se o conjunto de referência apresentar piores soluções [78].

Uma das grandes vantagens da BD em relação ao AG é a questão da geração das soluções iniciais, enquanto no AG a população inicial é construída de forma aleatória, na BD a população inicial é operada por meio de um conjunto de referência, dessa forma a busca é iniciada por um conjunto de soluções que representa mais satisfatoriamente o espaço de busca. Com a finalidade de garantir boas soluções para o conjunto de referência, cada solução é classificada de acordo com o valor do custo que representa para o problema. A partir do conjunto de referência, novos subconjuntos são gerados e são combinados para gerar um novo subconjunto [78].

A Figura 4.1 ilustra de forma resumida os processos que ocorrem na construção do algoritmo BD. O algoritmo é projetado para trabalhar sobre um conjunto de referência, tal conjunto irá armazenar as soluções consideradas melhores durante o processo de busca. A proposta é sempre melhorar a solução original. As soluções são geradas a partir de um método de geração de diversificação ou geração de soluções diversas, onde existe o objetivo de criar soluções distantes entre si, com a finalidade de garantir a diversidade, tal procedimento pode ser parcialmente aleatório ou totalmente determinístico, o objetivo é maximizar a distância entre as melhores soluções do conjunto de referência e as soluções diversas. Para construir o conjunto de referência é possível iniciar com as melhores soluções de uma população já determinada, no caso isso irá depender do tipo de problema a ser avaliado, pois nem sempre é possível gerar um conjunto de soluções iniciais com boas qualidades. Já o método de melhoria, visa aperfeiçoar as soluções que foram geradas pelo método de diversificação. Se tais soluções não forem viáveis, tal procedimento visa torná-las viáveis. O conjunto de referência vai sendo constantemente atualizado ao longo do processo de busca e seu tamanho vai permanecer constante até o final da execução. A partir do conjunto de referência, são selecionados subconjuntos para passar por um processo de combinação entre eles. A forma como serão escolhidos os subconjuntos é uma decisão que deve ser tomada na construção do projeto e de acordo com os resultados das simulações. Os subconjuntos serão formados de acordo com a qualidade das soluções. Existe uma vantagem no processo de combinação de subconjuntos, pois pode ocorrer uma

combinação entre todos os subconjuntos de referência e isso pode gerar uma atualização dinâmica no conjunto de referência [66-71].

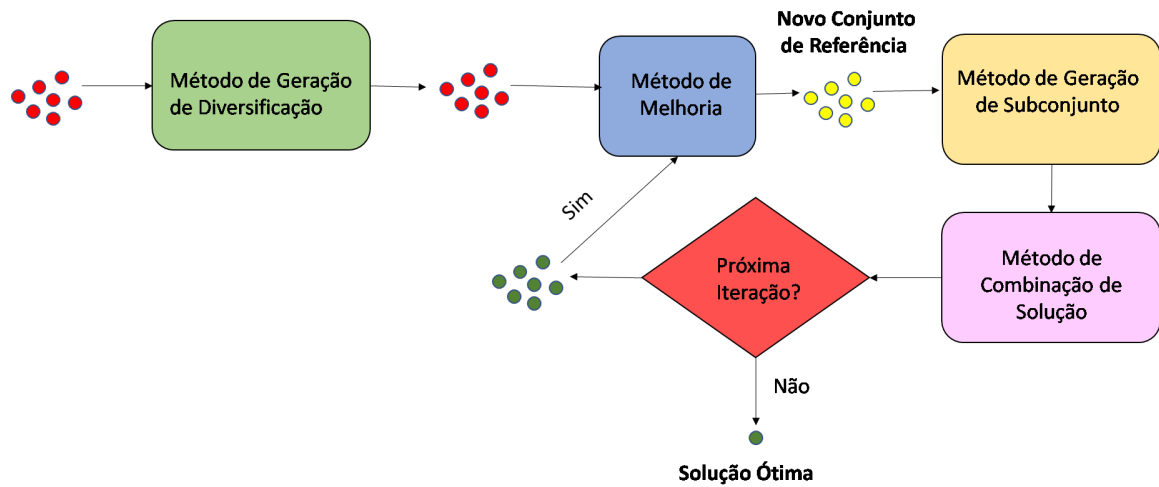


Figura 4.1: Fluxograma do algoritmo SS. Adaptado de [69] e [70].

A BD faz uso de técnicas para combinar vetores de soluções, que apresentaram eficiência em uma variedade de problemas. O objetivo da metaheurística BD é possibilitar a execução de métodos que possam originar novas soluções provenientes de elementos combinados, a fim de gerar melhores soluções [72].

4.2 Implementação da Busca Dispersa (BD)

Na implementação da BD foram utilizadas as etapas mais favoráveis ao problema proposto e sempre na tentativa de adequar o algoritmo BD ao problema.

Na otimização do *taper*, novas soluções foram criadas através do procedimento de geração de diversificação, da combinação de subconjuntos e do método de melhoria. Os elementos pertencentes ao conjunto de soluções de teste e ao conjunto de referência foram comparados por meio de uma função de custo, para que fosse possível classificar as soluções, a função de custo trata-se da eficiência de acoplamento.

Na implementação da BD foram utilizadas as etapas mais favoráveis ao problema proposto e sempre na tentativa de adequar o algoritmo BD ao problema.

Na otimização do *taper*, novas soluções foram criadas através do procedimento de geração de diversificação, da combinação de subconjuntos e do método de melhoria. Os elementos pertencentes ao conjunto de soluções de teste e ao conjunto de referência foram comparados por meio de uma função de custo, para que fosse possível classificar as soluções, a função de custo trata-se da eficiência de acoplamento.

No método de geração de soluções diversas, as soluções foram geradas totalmente

de forma aleatória, uma vez que na aplicação envolvida, não há certeza de quais são os comprimentos dos segmentos, que podem gerar maiores eficiência de acoplamento. Embora de acordo com o algoritmo BD clássico, a geração das soluções diversas pode ser totalmente determinística ou parcialmente aleatória [71], por isso o método que foi adotado para otimização das estruturas é inspirado na BD e não se trata da aplicação clássica do algoritmo.

Para geração de subconjuntos de cada tipo, existe uma quantidade de subconjuntos distintos que podem ser criados, as possibilidades de geração de subconjuntos foram calculadas abaixo de acordo com o tipo relacionado.

Possibilidades de geração de subconjuntos, ao considerar um conjunto de referência com b igual 10 elementos, ou seja, o conjunto de referência é constituído por 10 possíveis soluções.

Para o tipo 1:

$$C_{10,2} = \frac{10!}{2!(10-2)!} = 45 \text{ modos distintos} \quad (4.1)$$

Para o tipo 2:

$$C_{10,3} = \frac{10!}{3!(10-3)!} = 120 \text{ modos distintos} \quad (4.2)$$

Para o tipo 3:

$$C_{10,4} = \frac{10!}{4!(10-4)!} = 210 \text{ modos distintos} \quad (4.3)$$

Para o tipo 4:

$$C_{10,5} = \frac{10!}{5!(10-5)!} = 252 \text{ modos distintos} \quad (4.4)$$

Hipoteticamente, foi criada a Tabela 4.2 para representar as possibilidades de combinação entre soluções, a partir de um conjunto de referência que está representado na Tabela 4.1.

Na parte específica de geração de subconjuntos, foram escolhidas aleatoriamente soluções para formar os subconjuntos e posteriormente combiná-las, através da etapa de combinação do algoritmo BD. As soluções geradas pela combinação irão substituir o conjunto de referência, se possuírem valores mais altos de função objetivo. Foi utilizado um processo de atualização dinâmica, uma vez que as soluções geradas pela combinação são incorporadas de forma imediata ao conjunto de referência. O tamanho máximo da população foi respeitado ao decidir o tamanho dos subconjuntos gerados e como eles seriam combinados.

Tabela 4.1: Conjunto de Referência com cada uma das suas possíveis soluções e seus respectivos valores de função objetivo.

Conjunto de Referência	
Solução	Função Objetivo
1	43
2	65
3	15
4	54
5	23
6	92
7	12
8	56
9	31
10	45

Tabela 4.2: Possibilidades de subconjuntos gerados por cada tipo de subconjunto relacionados às soluções da Tabela 4.1.

Geração de Subconjuntos	
Tipo de Subconjunto	Possibilidades de Subconjuntos
Tipo 1	(1,2) (1,3) (1,4)(1,5)(1,6)(1,7)(1,8)(1,9)(1,10) (2,3) (2,4)(2,5)(2,6)(2,7)(2,8)(2,9)(2,10) (3,4)(3,5)(3,6)(3,7)(3,8)(3,9)(3,10) (4,5)(4,6)(4,7)(4,8)(4,9)(4,10) (5,6)(5,7)(5,8)(5,9)(5,10) (6,7)(6,8)(6,9)(6,10) (7,8)(7,9)(7,10) (8,9)(8,10) (9,10)
Tipo 2	(1,2,3)(1,2,4)(1,2,5)(1,2,6)(1,2,7)(1,2,8)(1,2,10)(1,3,4)(1,3,5)(1,3,6)(1,3,7)(1,3,8)(1,3,9)(1,3,10)(1,4,5)(1,4,6)(1,4,7)(1,4,8)(1,4,9)(1,4,10)(1,5,6)(1,5,7)(1,5,8)(1,5,9)(1,5,10)(1,6,7)(1,6,8)(1,6,9)(1,6,10)(1,7,8)(1,7,9)(1,7,10)(1,8,9)(1,8,10)(1,9,10)(2,3,4)(2,3,5)(2,3,6)(2,3,7)(2,3,8)(2,3,9)(2,3,10)(2,4,5)(2,4,6)(2,4,7)(2,4,8)(2,4,9)(2,4,10)(2,5,6)(2,5,7)(2,5,8)(2,5,9)(2,5,10)(2,6,7)(2,6,8)(2,6,9)(2,6,10)(2,7,8)(2,7,9)(2,7,10)(2,8,9)(2,8,10)(2,9,10)(3,4,5)....
Tipo 3	(1,2,3,4)(1,2,3,5)(1,2,3,6)(1,2,3,7)(1,2,3,8) (1,2,3,9)....
Tipo 4	(1,2,3,4,5)(1,2,3,4,6)(1,2,3,4,5,7)....

A Figura 4.2 ilustra de forma resumida os processos que ocorrem na construção da BD. No método de geração de diversificação, foram criadas 50 soluções de testes, cada solução com uma quantidade de 15 comprimentos de segmentos. Tais soluções foram avaliadas por meio do valor de eficiência de acoplamento e passaram por um processo de classificação, de acordo com valor de custo associado a cada solução. Em seguida, foi construído um conjunto de referência com as 10 melhores soluções de testes geradas inicialmente, ou seja, o tamanho da população inicial dividido por 5. A quantidade de 50

soluções está associada ao valor $5b$, sendo que o b é o número de elementos do conjunto de referência, que foi utilizado como $b = 10$ elementos. A partir desse conjunto de referência, subconjuntos do tipo 2 foram gerados e passaram por um processo de combinação para mesclar características de soluções, visando gerar soluções com valores de eficiência de acoplamento mais altas. Posteriormente, foi aplicado um método de melhoria, como forma de melhorar os valores de eficiência e também fazer com que soluções inviáveis fossem tornadas viáveis, e logo após realizar uma atualização do conjunto de referência, sempre objetivando atingir soluções melhores que as anteriores.

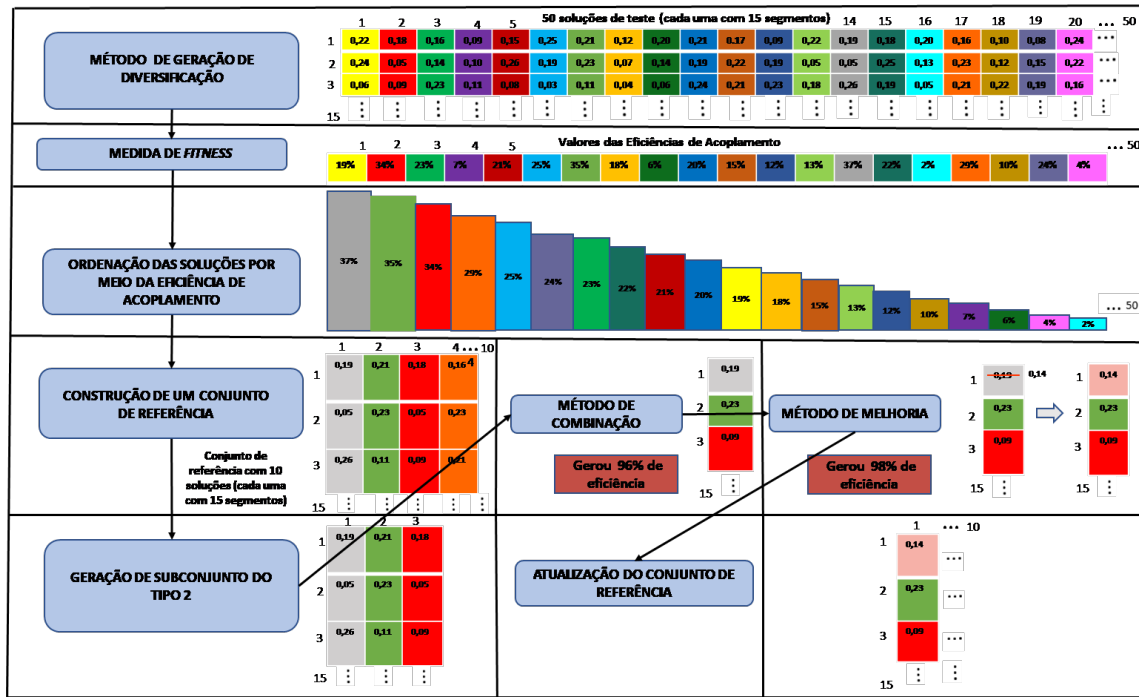


Figura 4.2: Representação da BD para o subconjunto do tipo 2 e conjunto de referência de tamanho $b = 10$.

A Figura 4.3 ilustra o fluxograma para BD melhorada e a Figura 4.4 o pseudocódigo utilizado para implementação do BD melhorada. Na Figura 4.4, os parâmetros: tamanho de solução de teste, tamanho do conjunto de referência, tipo de subconjunto, número de gerações foram inicializados, em seguida, uma população com as soluções de teste, representando o *taper* é criado. As soluções de teste são avaliadas por meio de uma função objetivo, que no caso é a eficiência de acoplamento. O conjunto de referência será gerado por meio da avaliação do conjunto de teste, e ele irá ser constituído por parte das melhores soluções do conjunto de teste, no caso 10 soluções das 50 soluções de teste foram escolhidas para compor o conjunto de referência.

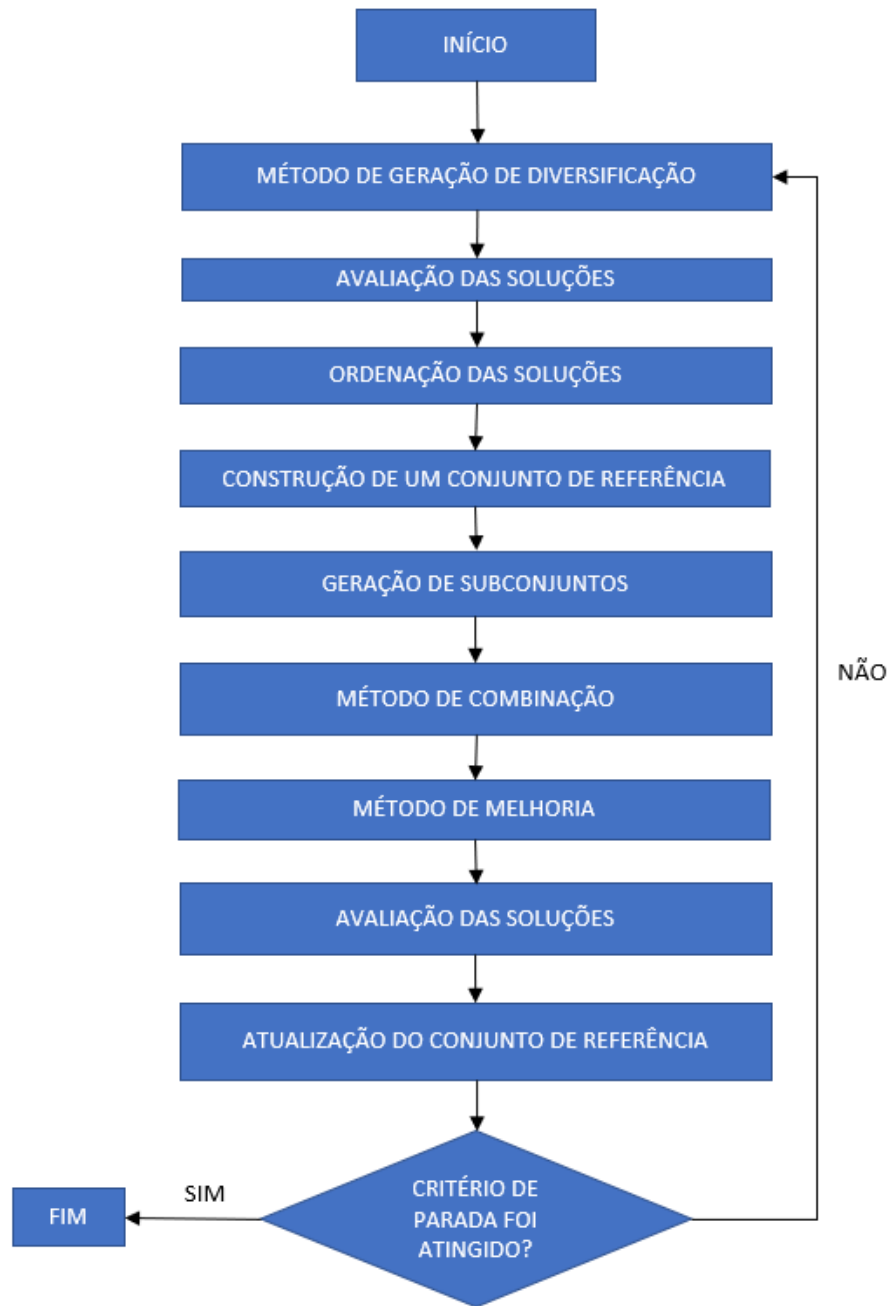


Figura 4.3: Fluxograma para o algoritmo BD melhorado.

Uma condicional foi criada para verificar se o algoritmo já atingiu o número de gerações definido, enquanto o algoritmo não atinge seu critério de parada, ele irá executar a criação de subconjuntos provenientes do conjunto de referência, irá combiná-los, em seguida esse conjunto resultante será melhorado e por conseguinte o conjunto de referência será atualizado.

procedure Scatter Search

Inicialize parâmetros

Crie população com soluções de teste

while critério de parada não for atingido ***do***

for i=1 to tamanho_populacao ***do***

avalie_soluções_de_teste(população_teste);

ordene_soluções(soluções_avaliables);

end for

Gere conjunto de referência

for i=1 to tamanho_conjunto_referência ***do***

gere_subconjuntos(conjunto_referência, tamanho_subconjunto);

combine_soluções(subconjuntos);

melhore_soluções(resultado_combinações);

atualize_conjunto_referência(conjunto_referência_resultante);

end for

end while

end procedure

Figura 4.4: Pseudocódigo do algoritmo BD.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Introdução

Foram realizadas diversas simulações para criação de várias configurações geométricas de guias de onda 2D, e para os testes foram variadas as intensidades de evaporação de feromônio, no caso do ACF e para o caso do BD foram variados os tipos de subconjuntos. Os resultados obtidos pelas metaheurísticas propostas mostram seu desempenho e utilidade na resolução de problemas eletromagnéticos. Para o MEF, a precisão está pelo menos na potência da ordem de 10^{-4} .

As eficiências de acoplamento para *tapers* relatados anteriormente apresentaram valores acima de 97% [19]. Os valores de eficiência de acoplamento obtidos pelo algoritmo de otimização colônia de formigas foram muito próximos ao encontrado na literatura, foram alcançadas eficiências de acoplamento superiores a 97,92% para intensidade menos intensa de evaporação de feromônio e superiores a 92,83% para intensidade mais intensa de evaporação. Já as eficiências obtidas para a BD, em relação aos tipos de subconjunto são: para o Tipo 1 foi de 97,63%, para o Tipo 2 foi de 94,27%, para o Tipo 3 foi de 93%, para o Tipo 4 foi de 95,46%.

Para otimização foi usado um procedimento iterativo, o procedimento é repetido até atingir 200 gerações. Aproximadamente foram gastos, em média, 10 minutos para cada geração do ACF em ambas as versões e 14 minutos para geração da BD nas quatro versões, sendo que em cada geração foram utilizadas 10 soluções de teste, em um computador Intel(R) Core(TM) i7-7500 CPU @2.70 GHZ.

Os resultados obtidos pelo ACF para as intensidades de feromônio relacionadas estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados do ACF.

Intensidade de Feromônio	Eficiência de Acoplamento
Menos Intensa	97,92%
Mais Intensa	92,83%

Os resultados obtidos pela BD para cada subconjunto estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados da BD.

Tipo de Subconjunto	Eficiência de Acoplamento
Tipo 1	97,63%
Tipo 2	94,27%
Tipo 3	93%
Tipo 4	95,46%

Nas Figuras 5.1 e 5.5 são apresentados os gráficos do número de gerações em função da eficiência de acoplamento para duzentas gerações para o ACF e nas Figuras 5.9, 5.13, 5.17 e 5.21 para a BD.

Nas Figuras 5.1 e 5.5 são apresentadas 10 formigas para cada geração e cada formiga está associada a uma eficiência de acoplamento. Em cada geração são apresentadas quais são as soluções, que as formigas vão encontrando. As formigas são representadas por símbolos e a cada geração, são executados processos que levam ao melhoramento das condições da composição de cada estrutura e algumas formigas são removidas, caso não apresentem um comportamento favorável ao problema e as que contribuem de forma a melhorar a eficiência de acoplamento são mantidas nas próximas gerações. Ao analisar o comportamento da evolução da eficiência de acoplamento, nas Figuras 5.1 e 5.5, é possível perceber que, duas das soluções obtidas graficamente mantêm-se em crescimento e continuam associadas às melhores eficiências de acoplamento, decorrência do processo de elitismo que foi utilizado para manter sempre as duas melhores soluções nas próximas gerações. Enquanto as outras oito soluções apresentam um comportamento, onde nem sempre os valores de eficiência de acoplamento apresentam aumentos, decorrência da modificação na intensidade da evaporação do feromônio, que gerou mudanças nas estruturas e conseqüente alteração nas eficiências de acoplamento nem sempre foram no sentido de crescimento.

Já nas Figuras 5.9, 5.13, 5.17 e 5.21, mudanças na evolução da eficiência de acoplamento foram resultantes do tipo de subconjunto escolhido para implementação da BD. Cada símbolo representa uma solução e cada solução está associada a um valor de eficiência de acoplamento. Pelas simulações realizadas, foi possível perceber que o subconjunto do Tipo 1 apresentou valores de eficiência maiores, resultados foram apresentados na Tabela 5.2, decorrência da forma com que o conjunto de referência é particionado para gerar o subconjunto do Tipo 1, pois a partir das subdivisões, o método de combinação vai gerar um conjunto de referência diferente dos demais formados pelos outros tipos de subconjuntos.

Tanto para o ACF, quanto para a BD foram utilizadas 200 gerações como critério de parada, uma vez que foi observado o comportamento de convergência com tal número de gerações.

A solução para o problema do *taper*, não se trata de algo trivial, não é algo intuitivo, é possível ver isso com a análise das soluções geradas após a otimização nas Figuras 5.4, 5.8, 5.12, 5.16, 5.20 e 5.24. Em relação aos comprimentos dos segmentos em função de suas posições no *taper*, o valor do comprimento dos segmentos varia com a posição, de uma forma não trivial.

Na Figura 5.2 está apresentada a estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pelo ACF com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, sendo $a = [741[0,0415; 0,0799; 0,1084; 0,1571; 0,1481; 0,1678; 0,1678; 0,1796; 0,1645; 0,1940; 0,1614; 0,1650; 0,1652; 0,1488; 0,1423]$. Na Figura 5.3 a distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pelo ACF com 10 formigas e para evaporação de feromônio menos intensa.

Na Figura 5.6 está apresentada a estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pelo ACF com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, sendo $a = [0,0411; 0,0559; 0,0509; 0,0539; 0,0518; 0,0547; 0,0495; 0,0547; 0,0501; 0,0518; 0,0500; 0,0500; 0,0527; 0,0776; 0,0776]$. Na Figura 5.7 a distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pelo ACF com 10 formigas e para evaporação de feromônio mais intensa.

Na Figura 5.10 está apresentada a estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, sendo $a = [0,0306; 0,0623; 0,1184; 0,1251; 0,1299; 0,1301; 0,1347; 0,1379; 0,1739; 0,1616; 0,1395; 0,1788; 0,1346; 0,1565; 0,1346]$. Na Figura 5.11 a distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BD com conjunto de referência de tamanho $b=10$ e subconjunto do tipo 1.

Na Figura 5.14 está apresentada a estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, sendo

$a=[0,0565; 0,0869; 0,1475; 0,1475; 0,1461; 0,1232; 0,1475; 0,1475; 0,1503; 0,1475; 0,1542; 0,1475; 0,1542; 0,1542; 0,1272]$. Na Figura 5.15 está apresentada a distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BD com conjunto de referência de tamanho $b=10$ e subconjunto do tipo 2.

Na Figura 5.18 está apresentada a estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, sendo $a=[0,0552; 0,0719; 0,1363; 0,1292; 0,1292; 0,1911; 0,1292; 0,1947; 0,1333; 0,2242; 0,1390; 0,1954; 0,1666; 0,1391; 0,1666]$. Na Figura 5.19 está apresentada a distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BD com conjunto de referência de tamanho $b=10$ e subconjunto do tipo 3.

Na Figura 5.22 está apresentada a estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, sendo $a=[0,0306; 0,0772; 0,0903; 0,0923; 0,1534; 0,1144; 0,1933; 0,1212; 0,1933; 0,1677; 0,1677; 0,1677; 0,1586; 0,1221; 0,1586]$. Na Figura 5.23 está apresentada a distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BD com conjunto de referência de tamanho $b=10$ e subconjunto do tipo 4.

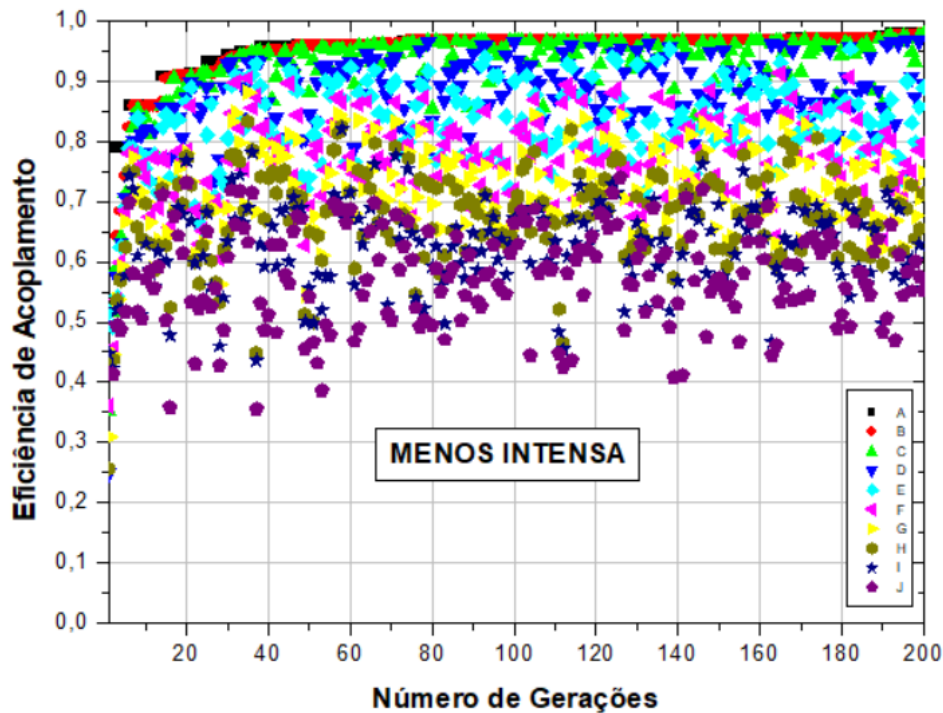


Figura 5.1: Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores formigas do ACF, ao considerar uma evaporação do feromônio MENOS INTENSA.

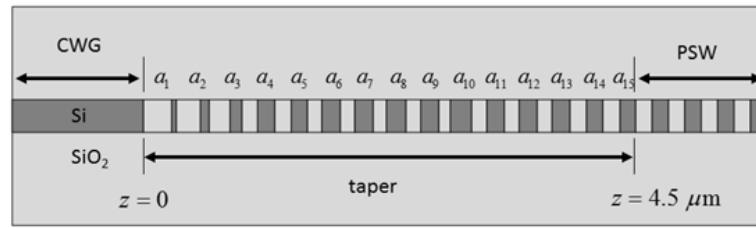


Figura 5.2: Estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pelo ACF e seus respectivos valores de comprimentos de segmentos com 10 formigas e evaporação de feromônio MENOS INTENSA.

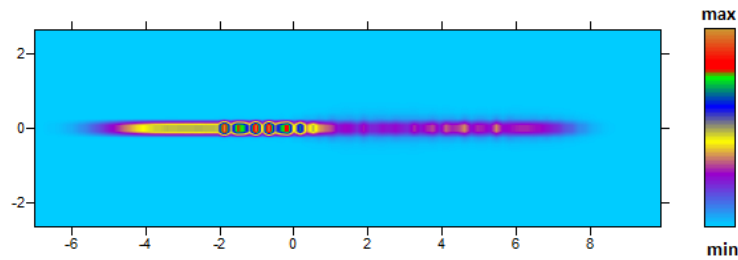


Figura 5.3: Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pelo ACF com 10 formigas e evaporação de feromônio MENOS INTENSA.

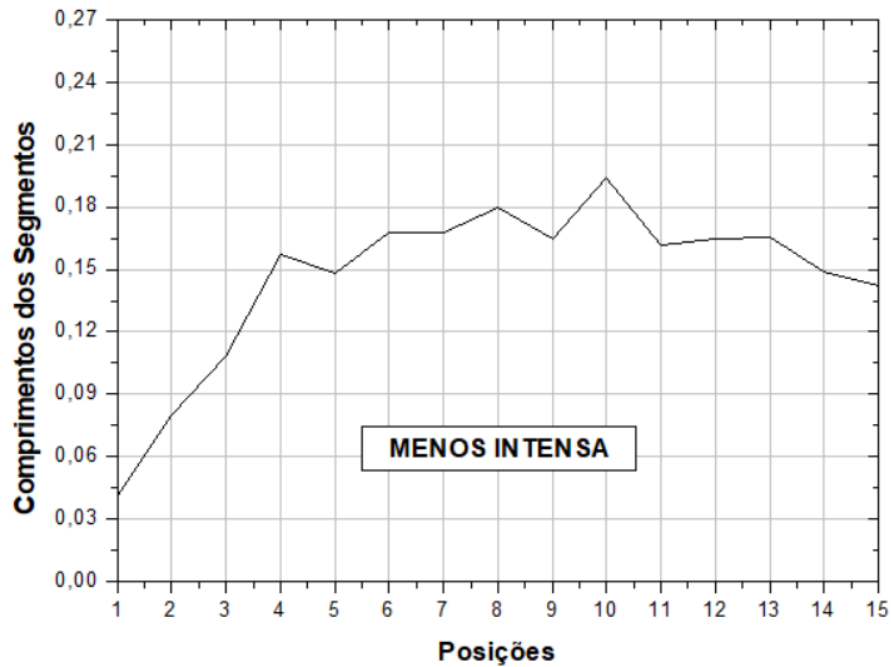


Figura 5.4: Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para evaporação de feromônio MENOS INTENSA.

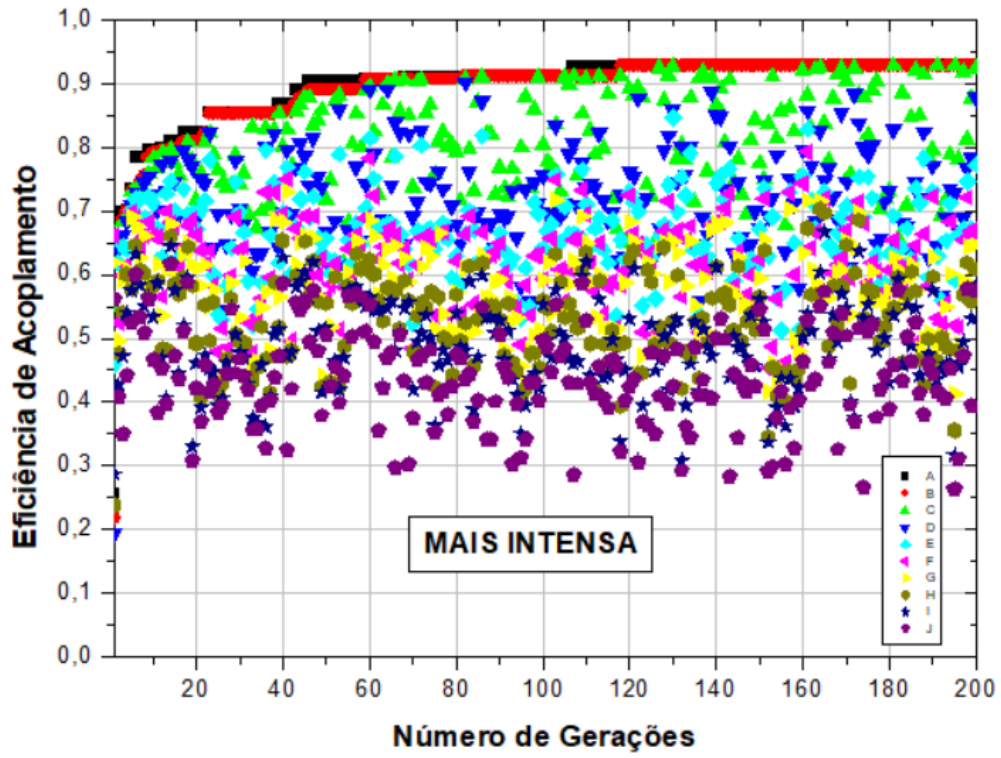


Figura 5.5: Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores formigas do ACF, ao considerar uma evaporação de feromônio MAIS INTENSA.

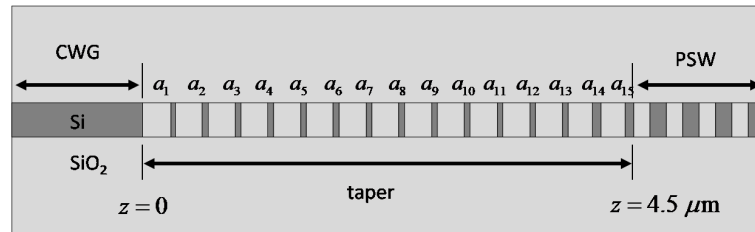


Figura 5.6: Estrutura resultante do *taper* segmentado encontrado pelo ACF com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos com 10 formigas e evaporação de feromônio MAIS INTENSA.

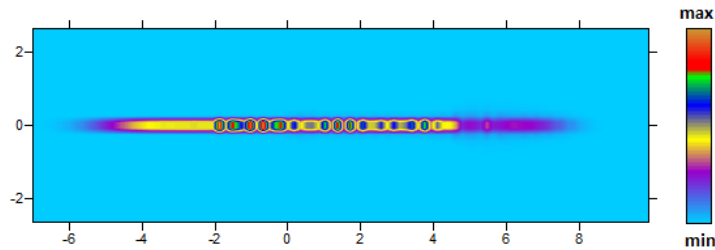


Figura 5.7: Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pelo ACF com 10 formigas e evaporação de feromônio MAIS INTENSA.

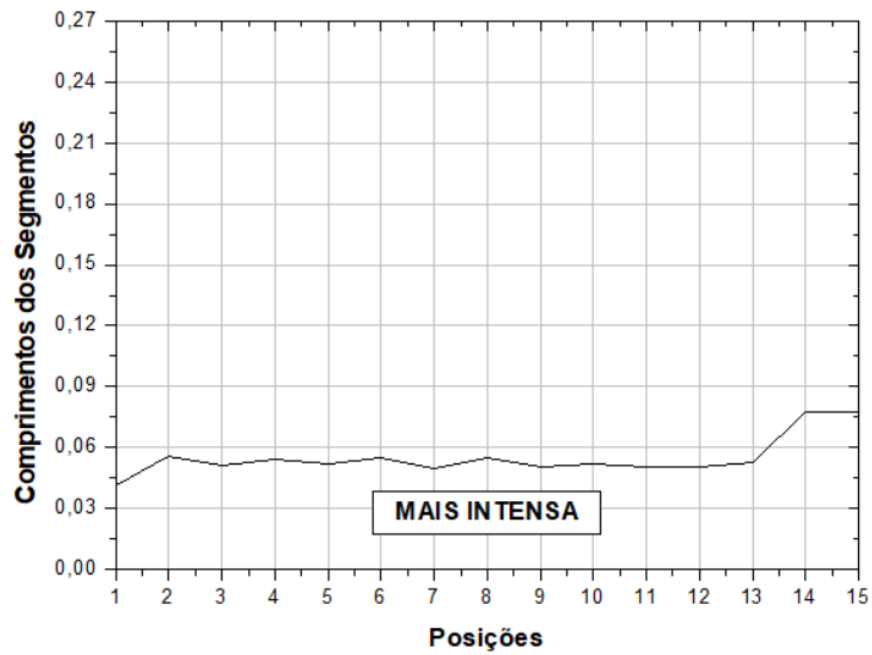


Figura 5.8: Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para evaporação do feromônio MAIS INTENSA.

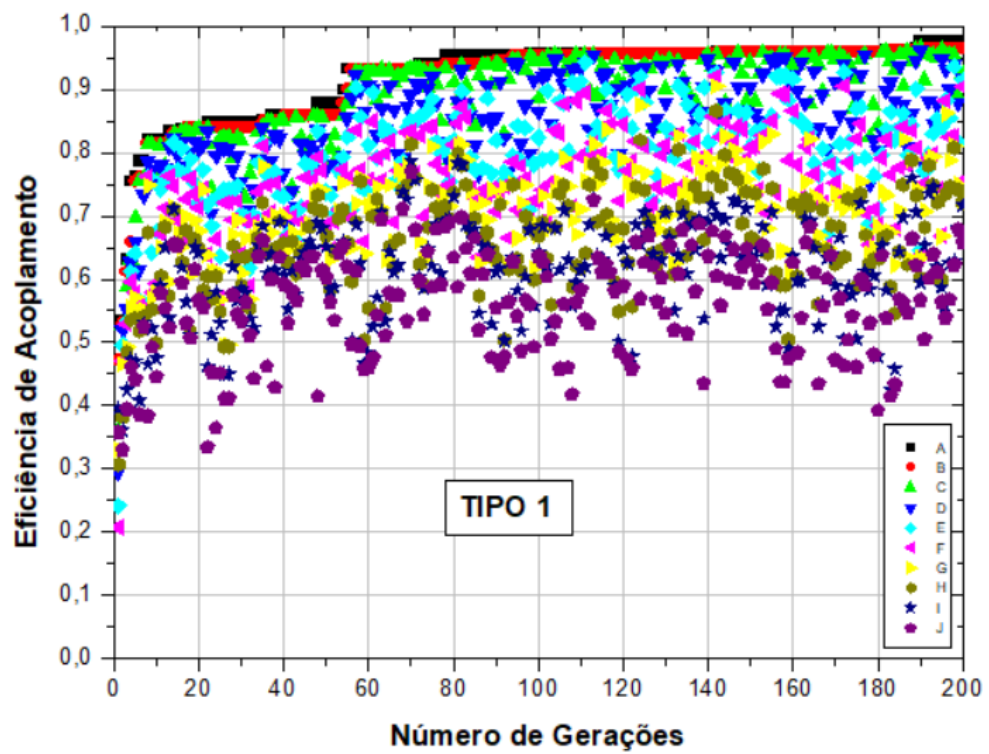


Figura 5.9: Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 1.

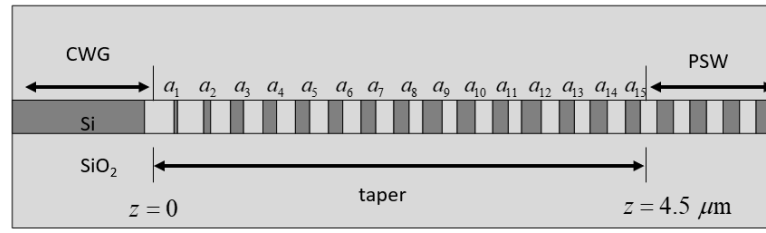


Figura 5.10: Estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 1.

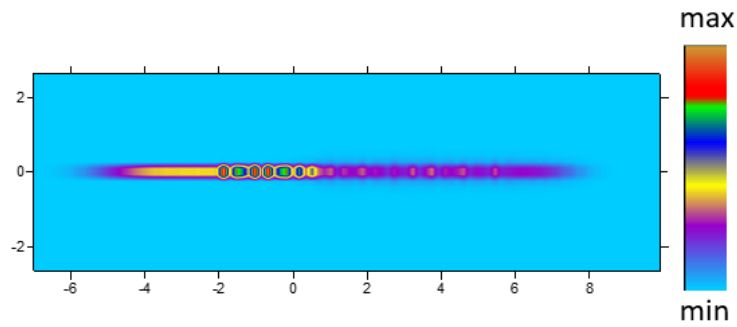


Figura 5.11: Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BD, ao considerar subconjunto do TIPO 1.

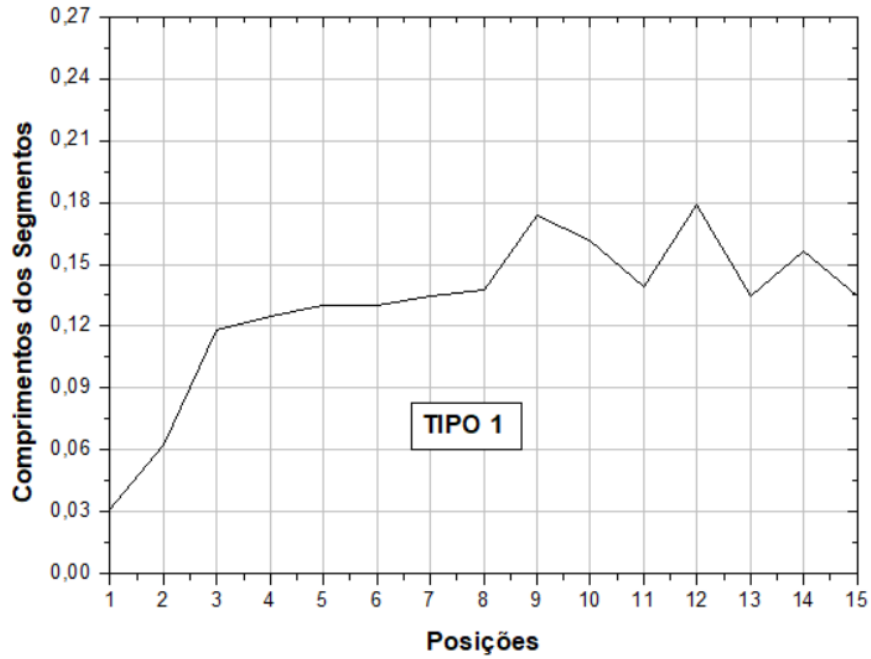


Figura 5.12: Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 1.

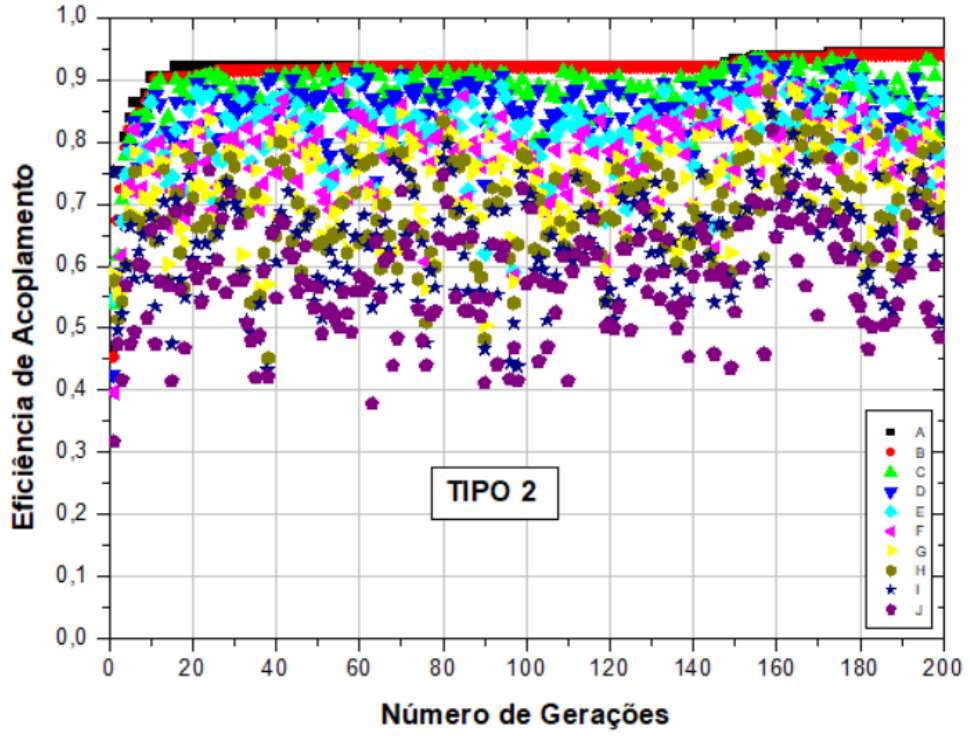


Figura 5.13: Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 2.

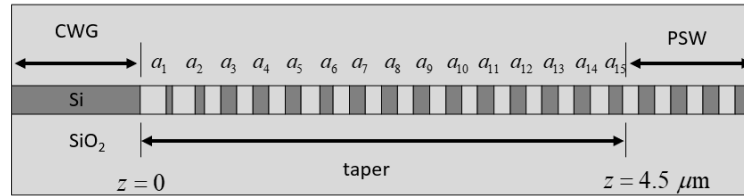


Figura 5.14: Estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 2.

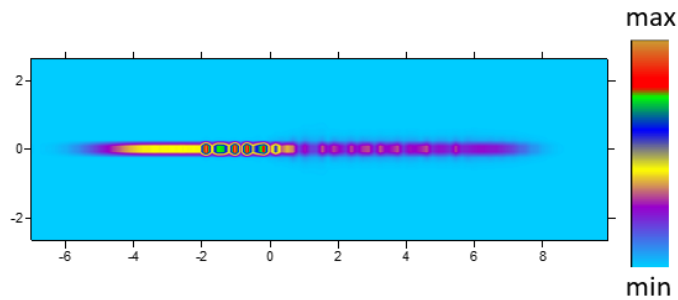


Figura 5.15: Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BB e subconjunto do TIPO 2.

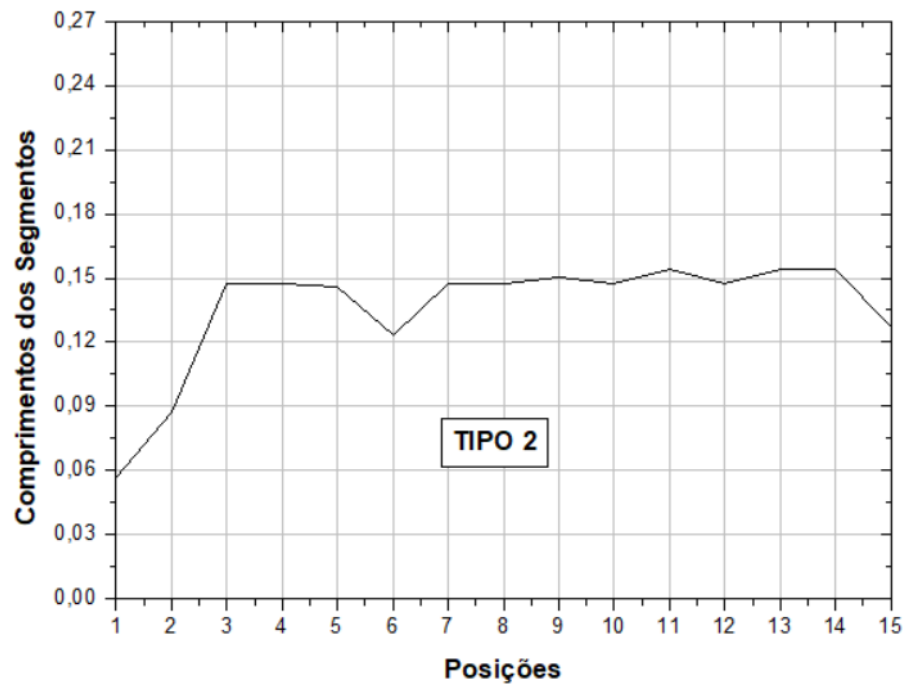


Figura 5.16: Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 2.

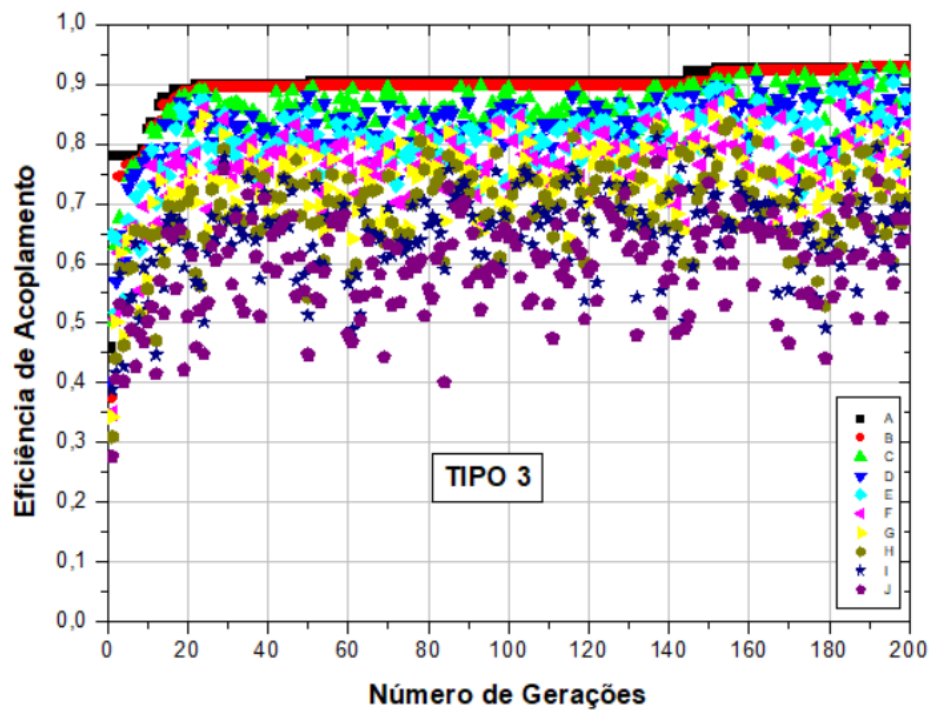


Figura 5.17: Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 3.

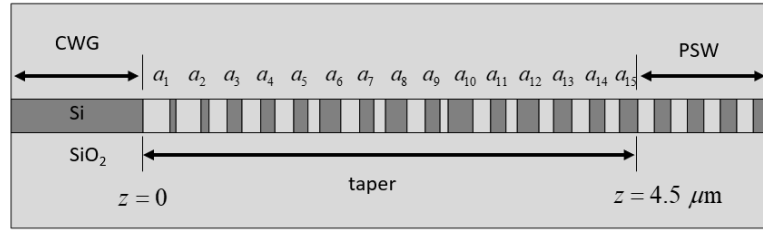


Figura 5.18: Estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 3.

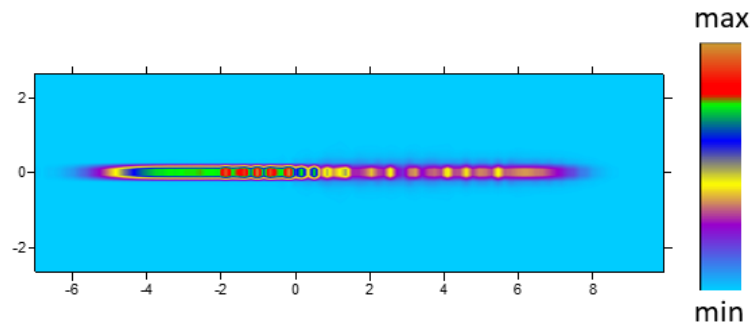


Figura 5.19: Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BB e subconjunto do TIPO 3.

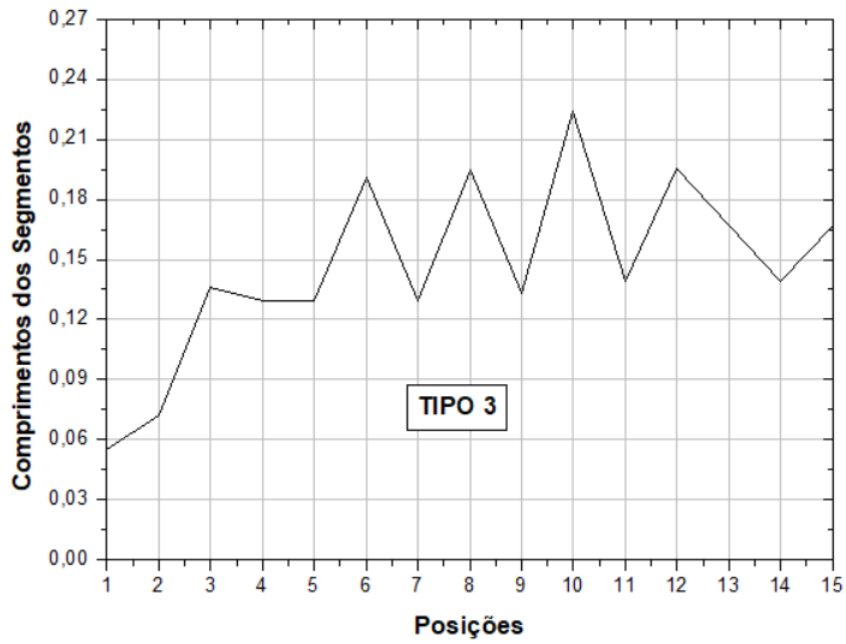


Figura 5.20: Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 3.

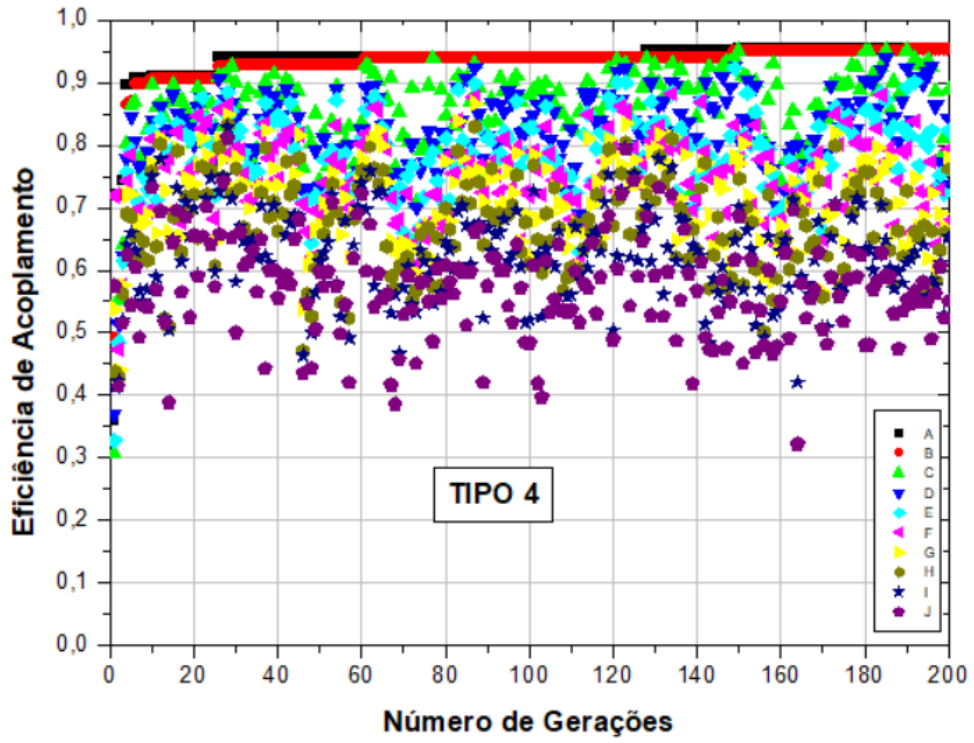


Figura 5.21: Evolução da eficiência de acoplamento em relação ao número de gerações para as melhores soluções da BD, ao considerar subconjunto do TIPO 4.

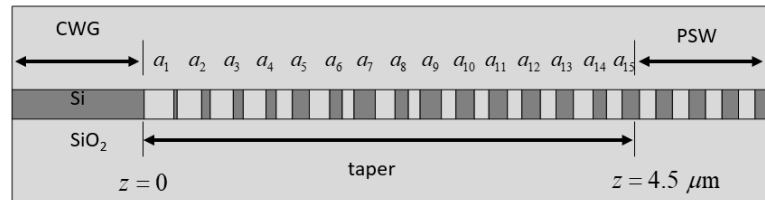


Figura 5.22: Estrutura resultante do *taper* segmentado otimizada pela BD com seus respectivos valores de comprimentos de segmentos, ao considerar subconjunto do TIPO 4.

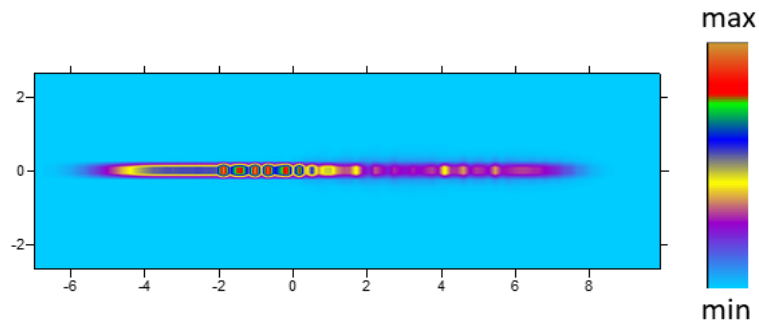


Figura 5.23: Distribuição espacial da intensidade do campo da estrutura otimizada pela BB e subconjunto do TIPO 4.

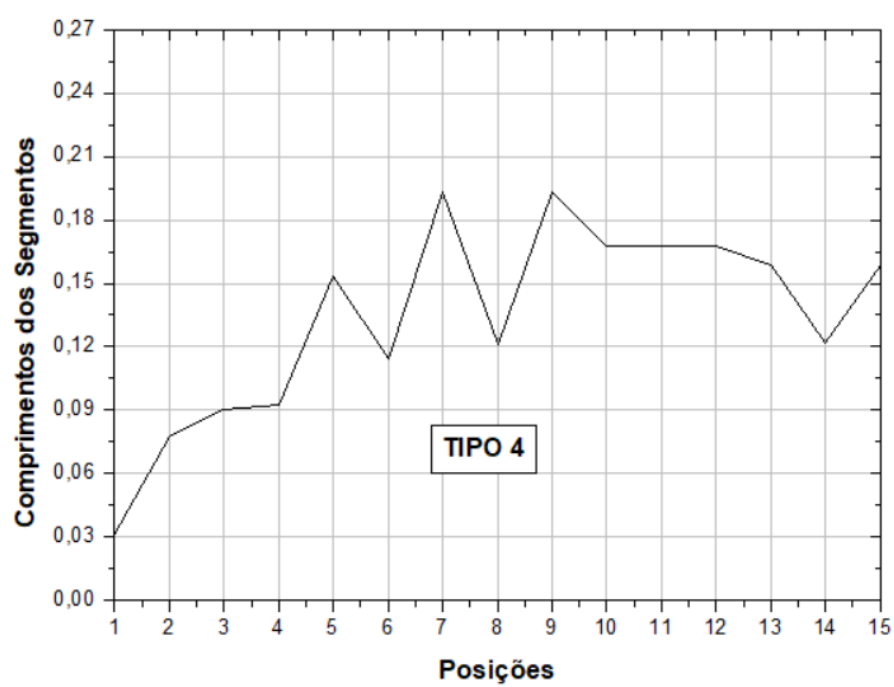


Figura 5.24: Relação entre as posições e o comprimento dos segmentos para subconjunto do TIPO 4.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho, novas configurações de tapers foram propostas através da otimização de tapers segmentados, compostos por silício e sílica, através de metaheurísticas juntamente com a utilização do MEF.

Os fatores de grande relevância para o ACF estão concentrados na seleção inicial realizada pela colônia de formigas e na concentração de feromônio aplicada dinamicamente de acordo com a eficiência de acoplamento. É possível reduzir a influência dos feromônios depositados nos estágios iniciais de busca através da evaporação de feromônios e evitar que as possíveis soluções de baixa qualidade sejam criadas inicialmente pelas formigas nos instantes iniciais. Já para a BD, o tipo de subconjunto escolhido para otimizar a estrutura tem forte influência no valor final da eficiência de acoplamento, uma vez que o método de combinação da BD é realizado com os subconjuntos definidos em etapa anterior.

Não foram encontrados trabalhos similares na área e na literatura aplicando as metaheurísticas propostas neste trabalho. Não há uma técnica de otimização melhor que a outra, é necessário realizar os testes para cada problema específico. As metaheurísticas auxiliam na busca por solução através de descobertas, ao longo do processo. A eficiência da metaheurística dependerá de como serão utilizados os conhecimentos adquiridos ao longo do processo de busca, o que poderá evitar ótimos locais, que estejam afastados de ótimos globais.

Os resultados obtidos para as estruturas propostas mostraram que as metaheurísticas propostas apresentam um bom funcionamento para otimizá-las. Foi possível observar que o desempenho dos dispositivos analisados depende fortemente das geometrias de cada dispositivo. Alternativamente, o problema poderia ser resolvido por um método determinístico como, por exemplo, o método tipo gradiente, seu uso seria viabilizado pela análise da função objetivo, para determinar a direção de busca do ponto de solução, para tanto seria necessário partir de um ponto inicial, e todos os passos podem ser previstos, se a partida se der sempre do mesmo ponto inicial. As metaheurísticas fazem a busca

pela solução por meio de regras probabilísticas, por seu caráter aleatório, as mesmas sequências não seriam simuladas em execuções sucessivas, ainda que partindo do mesmo ponto inicial, o que gera a possibilidade de respostas diferentes e amplia a possibilidade de soluções diferentes.

Para trabalhos futuros, são sugeridos: o desenvolvimento de novas metaheurísticas e de métodos tradicionais, juntamente com mudança de parâmetros populacionais e critérios que possam gerar maior diversidade durante o processo de busca, além da variação de outros parâmetros do guia de onda periodicamente segmentado, tais como: largura do guia de onda, altura dos segmentos e periodicidade.

6.1 Trabalho completo publicado em anais de congressos durante o mestrado:

DA FRANÇA VIEIRA, LUANA; RODRIGUEZ-ESQUERRE, VITALY F.; DOURADO SISNANDO, ANDERSON; RUBIO MERCEDES, COSME EUSTAQUIO. “Subwavelength 2D segmented waveguide taper light coupling optimization by evolutionary algorithms”. In: Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices XIV, 2017, San Diego. Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices XIV, 2017. p. 33.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Grossmann, T. Wienhold, U. Bog, T. Beck, C. Friedmann, H. Kalt e T. Mappes, “Polymeric photonic molecule super-mode lasers on silicon,” *Light: Science & Applications* vol. 2, no.5, e82, pp. 1-4, 2013.
- [2] B. Bêche, N. Pelletier, E. Gaviot, R. Hierle, A. Goullet, J.P. Landesman e J. Zyss, “Conception of optical integrated circuits on polymers,” *Microelectronics Journal* vol. 37, no.5, pp. 421-427, 2006.
- [3] T. Beck, S. Schloer, T. Grossmann, T. Mappes e H. Kalt, “Flexible coupling of high-Q goblet resonators for formation of tunable photonic molecules,” *Optics Express*, vol.20, pp. 22012–22017, 2012.
- [4] L. Sanchis, A. Håkansson, D. López-Zanón, J. Bravo-Abad, e J. Sánchez-Dehesa, “Integrated optical devices design by genetic algorithm,” *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 22, pp. 4460-4462, 2004.
- [5] A. D. Sisnando, V. F. R. Esquerre e C. E. R. Mercedes, “Power coupling optimization in periodical segmented waveguides by bio-inspired algorithms,” *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America)*, paper JW2A.82, 2016.
- [6] A. Iguchi , Y. Tsuji , T. Yasui e K. Hirayama, “Topology Optimization of optical waveguide devices based on beam propagation method with sensitivity analysis,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no.18, pp. 4214-4220, 2016.
- [7] K. Kasaya, O. Mitomi, M. Naganuma, Y. Kondo e Y. Noguchi, “A simple laterally tapered waveguide for low-loss coupling to single-mode fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 345–347, 1993.

- [8] C.W. Chang, M.L. Wu e W.F. Hsieh, “Design of low-loss tapered waveguides using the telescope structure compensation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 1378–1380, 2003.
- [9] R. Zengerle e W. Weiershausen, “Tapered two-layer InGaAsP/InP waveguides for highly efficient chip coupling to single-mode fibers,” *Optics Communications*, vol.115, no. 5-6, pp. 453-460,1995.
- [10] A. Sure, T. Dillon, J. Murakowski, C. Lin, D. Pustai e D. W. Prather, “Fabrication and characterization of three-dimensional silicon tapers,” *Optics Express*, vol. 11, no. 26, pp. 3555-3561, 2003.
- [11] V. R. Almeida, R.R. Panepucci e M. Lipson, “Nanotaper for compact mode conversion,” *Optics Letters*, vol. 28, no.15, pp. 1302-1304, 2003.
- [12] N. Burt, J. S. Harris e L. Scaccabarozzi, “Design and fabrication of tapered waveguides in AlGaAs for coupling light in nanoscale optoelectronic devices,” *NNIN REU Research Accomplishments*, Site: Stanford Nanofabrication Facility, Stanford University, pp. 28-29, 2004.
- [13] B. Luyssaert , P. Bienstman , P. Vandersteegen , P. Dumon e R. Baets, “Efficient nonadiabatic planar waveguide tapers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 8, pp. 2462-2467, 2005.
- [14] B. Luyssaert , P. Vandersteegen, D. Taillaert, P. Dumon , W. Bogaerts , P. Bienstman, D. Van Thourhout , V. Wiaux, S. Beckx e R. Baets, “A compact photonic horizontal spot-size converter realized in silicon-on-insulator,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 73-75, 2005.
- [15] Y. F. Chau, Y.S Sun e D. P. Tsai, “Two-dimensional and three-dimensional analysis of taper structures for coupling into and out of photonic crystal slab waveguides,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 45, no. 10A, pp. 7746–7752, 2006.
- [16] Z. Wang, N. Zhu, Y. Tang, L. Wosinski, D. Dai e S. He, “Ultracompact low-loss coupler between strip and slot waveguides,” *Optics Letters*, vol. 34, no.10,

pp. 1498-1500, 2009.

[17] Y. Biao, L. Z. Yong, Y.Y. De e Y. J. Zhong, “High-efficiency focusing grating coupler with optimized ultra-short taper,” *Chinese Physics B*, vol. 23, no.11, article id. 114206, 2014.

[18] Y. Fu, T. Ye, W. Tang e T. Chu, “Efficient adiabatic silicon-on-insulator waveguide taper,” *Photonics Research*, vol. 2, no.3, pp. A41-A44, 2014.

[19] A. D. Sisnando, V.F.R. Esquerre, C. E. R. Mercedes, L. F. Vieira e I. M. T. Ruffini, “Power Coupling Optimization in 2D Waveguides by Evolutionary Algorithms,” *Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 14, pp. 1561-1564, 2015.

[20] A. D. Sisnando, L. F. Vieira, V.F.R. Esquerre e C. E. R. Mercedes, “2D taper segmented design by differential evolution algorithm,” *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Porto de Galinhas, pp. 1-4, 2015.

[21] K. Yoo e J. H. Lee, “Design of a high-efficiency fiber-to-chip coupler with reflectors,” *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, vol. 5, no. 2, pp. 123-128, 2016.

[22] P. Sethi, R. Kallege, A. Haldar e S. K. Selvaraja, “Compact Broadband Low-Loss Taper for Coupling to a Silicon Nitride Photonic Wire,” *Centre for Nano Science and Engineering (CeNSE)*, Indian Institute of Science, Bengaluru, India. *Boston University College of Engineering*, Boston University, Amherst, USA, vol. 1711.09831, 2017.

[23] Y. Liu, X. Wang, Y. Dong e X. Wang, “Compact and efficient large cross-section SOI rib waveguide Taper optimized by a genetic algorithm,” *Proc. SPIE*, vol. 10244, *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics Technology and Application*, vol. 10244, id. 1024424 10 pp., 2017.

[24] D. B. Fogel, “The Advantages of Evolutionary Computation,” *Proceeding Biocomputing and emergent computation Conference*, World Scientific Press, Singapore, pp. 1-11, 1997.

- [25] Y. Tsuji, K. Hirayama, T. Nomura, K. Sato e S. Nishiwaki, “Design of optical circuit devices based on topology optimization,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 850–852, 2006.
- [26] J. S. Jensen e O. Sigmund, “Systematic design of photonic crystal structures using topology optimization: Low-loss waveguide Bends,” *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 12, pp. 2022-2024, 2004.
- [27] C. Valenzuela, B. Crawford, R. Soto, E. Monfroy e F. Paredes, “A 2-level Metaheuristic for the Set Covering Problem,” *International Journal of Computers, Communications & Control*, vol. 7, no. 2, pp. 377-387, 2012.
- [28] E. Talbi, “Metaheuristics: From Design to Implementation,” Wiley Publishing, 2009.
- [29] M. Dorigo, “Optimization, learning and natural algorithms”, Tese de Doutorado, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Itália, 1992.
- [30] A. D. Sisnando, “Otimização de dispositivos fotônicos utilizando algoritmos bio-inspirados,” Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, 2015.
- [31] R. E. R. Noriega, “Estudo de guias periodicamente segmentados usando o método dos elementos finitos,” Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas– Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, São Paulo, 2012.
- [32] E. G. Neumann, “Reducing radiation loss of tilts in dielectric optical waveguides,” *Electronics Letters*, vol. 17, no. 5 pp. 369–371, 1986.
- [33] A. R. Nelson, “Coupling optical waveguides by tapers”, *Applied Optics*, vol. 14, no. 12, pp. 3012–3015, 1975.
- [34] W. K. Burns, A. F. Milton e A. B. Lee, “Optical waveguide parabolic coupling horns,” *Applied Physics Letters*, vol. 30, no. 28, pp. 28–30, 1977.
- [35] A. F. Milton e W. K. Burns, “Mode coupling in optical waveguide horns,” *IEEE*

Journal of Quantum Electronics, vol. 13, no.10, pp. 828–835, 1977.

[36] T. Felici e H. W. Engl, “On shape optimization of optical waveguides using inverse problem techniques,” *Inverse Problems*, vol. 17, no. 4, pp. 1141–1162, 2001.

[37] W. Bogaerts, P. Dumon, B. Luyssaert e P. Bienstman, “Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 401-412, 2005.

[38] Q. Xu, B. Schmit, S. Pradhan e M. Lipson, “Micrometre-scale silicon electro-optic modulator,” *Nature*, vol. 435, no.7040, pp. 325-327, 2005.

[39] Y. Vlasov, W. M. J. Green e F. Xia, “High-throughput silicon nanophotonic wavelength-insensitive switch for on-chip optical networks,” *Nature Photonics*, vol. 2, no. 4, pp. 242-246, 2008.

[40] R. Soref, “The past, present, and future of silicon photonics,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 1678–1687, 2006.

[41] T. Z. Abbas, “Fiber Optics,” *Electrical Engineering Department-UOT*, 2011-2012, Disponível em:

[42] H. Abramczyk, “Dispersion phenomena in optical fibers, Technical University of Lodz,” *Laboratory of Laser Molecular Spectroscopy*, 93- 590 Lodz, Wroblewskiego 15 str, Poland, Disponível em: <http://www.mitr.p.lodz.pl/evu/lectures/Abramczyk3.pdf> , acesso em 15/02/2018.

[43] M. Koshiba, “Optical Theory by the Finite Element Method,” New York, KTK Scientific-Kluwer Academic, 1992.

[44] M. Khanzadeh, M. Malekshahi e A. Rahmati, “Optimization of loss in orthogonal bend waveguide: Genetic algorithm simulation,” *Alexandria Engineering Journal*, vol.52, no.3, pp. 525-530, 2013.

[45] R. D. Cook, D. S. Malkus e M. E. Plesha, “Concepts and applications of finite element analysis”, John Wiley & Sons, 1989.

- [46] L. A. M. Antoniacomi e S. I. S. Souza, “A técnica dos múltiplos domínios aplicada à geração de malhas no software ANSYS CFX-MESH,” VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande/PB, 2010.
- [47] V. F. R. Esquerre, “Modelagem de estruturas fotônicas por elementos finitos 2D no domínio do tempo”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, São Paulo, Abril 2003.
- [48] N. Marcuvitz, Ed., “Waveguide Handbook,” New York: McGraw-Hill, 1951.
- [49] J.P.Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *Journal of Computational Physics*, vol.114, no. 1, pp. 185–200, 1994.
- [50] C. E. R. Mercedes, V. F. R. Esquerre, I. T. Lima e H. E. H. Figueroa, “Analysis of Straight Periodic Segmented Waveguide Using the 2-D Finite Element Method,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no.11, pp. 2163-2169, 2014.
- [51] Y. Tsuji e M. Koshiba, “Finite element method using port truncation by perfectly matched layer boundary conditions for optical waveguide discontinuity problems,” *Journal of lightwave technology*, vol. 20, no. 3, pp. 463 - 468, 2002.
- [52] V. E. Nascimento, “Aplicação da técnica LOD em métodos no domínio do tempo e frequência para modelagem de meios convencionais e metamateriais,” Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos, Outubro 2007.
- [53] J. Yuan, J. Yang, D. Shi, W. Ai e T. Shuai, “Design optimization of a low-loss and wide-band sharp 120° waveguide Bend in 2D photonic crystals,” *Optics Communications*, vol. 367, pp.356–363, 2016.
- [54] C. Manolatou, S.G. Johnson , S. Fan, P.R. Villeneuve , H.A. Haus e J.D. Joannopoulos , “High-Density Integrated Optics,” *Journal of Lightwave Technology*, vol.17, no. 9, pp. 1682-1692, 1999.
- [55] M. Dorigo , V. Maniezzo e A. Colorni, “Ant system: optimization by a co-

lony of cooperating agents,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol. 26, no.1, pp. 29-41, 1996.

[56] M. Dorigo, G. D. Caro e L.M. Gambardella, “Ant algorithms for discrete optimization,” Artificial Life, vol.5, no.2, pp. 137-172, 1999.

[57] M. Dorigo, E. Bonabeau e G. Theraulaz, “Ant algorithms and stigmergy,” Future Generation Computer Systems, vol. 16, no. 9, pp. 851–871, 2000.

[58] C. Blum, “Ant colony optimization: introduction and recent trends,” Physics of Life Reviews, vol. 2, no. 4, pp. 353–373, 2005.

[59] E. R. Iglesias e O. Q. Teruel, “Linear array synthesis using an ant-colony-optimization-based algorithm,” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 49, no. 2, pp. 70 – 79, 2007.

[60] M. Förster, B. Bickel, B. Hardung e G. Kókai, “Self-adaptive ant colony optimisation applied to function allocation in vehicle networks,” GECCO Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation, pp. 1991-1998, 2007.

[61] A. Shekhawat, P. Poddar e D. Boswal, “Ant colony optimization algorithms :introduction and beyond,” Artificial Intelligence Seminar, Indian Institute of Technology, Mumbai, 2009, Disponível em http://mat.uab.cat/~alseda/MasterOpt/ACO_Intro.pdf, acesso em 15/02/2018.

[62] J. Lin, Y. Zhong, X. Lin, H. Lin e Q. Zeng, “Hybrid ant colony algorithm clonal selection in the application of the cloud’s resource scheduling,” Distributed Parallel, and cluster computing, arXiv:1411.2528v1, 2014.

[63] M. Dorigo e T. Stützle, “Ant Colony Optimization,” A Bradford Book; 1st Edition, 1st Printing edition, 1984.

[64] T. Stutzle, M. L. Ibáñez, P. Pellegrini, M. Maur, M. M. Oca, M. Birattari e M. Dorigo, “Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization,” IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de D’éveloppements en Intelligence Artificielle Université Libre de Bruxelles, pp. 1-24, 2010.

- [65] A. M. Jabbar, “Controlling the Balance of Exploration and Exploitation in ACO Algorithm,” *Journal of University of Babylon, Pure and Applied Sciences*, vol. 26, no.4, pp. 1-9, 2018.
- [66] M. Laguna e R. Martí, University of Colorado, University of Valencia, “Scatter search: methodology and applications,” Disponível em: <http://gama.fime.uanl.mx/roger/work/teaching/mecbs5122/4-Scatter>
- [67] M. Laguna, R. Martí, “Scatter Search: Methodology and implementations in C,” Academic Publishers, Boston, 2003.
- [68] M. J. F. Souza, “Busca dispersa-scatter search,” Universidade Federal de Ouro Preto, Disponível em <http://www.decom.ufop.br/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.htm> , acesso em 16/02/2018.
- [69] A. Puspitasari e L. H. Pramono, “Scatter search”, Media Digital and Game Technology, Institut Teknologi Bandung, 2012.
- [70] X. Guo e S. Liu, “A scatter search approach for multiobjective selective disassembly sequence problem,” *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2014, no. 756891, pp. 1–9, 2014.
- [71] “Scatter search,” 2010, Disponível em https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1995739/mod_resource/content/1/ScatterSearch_out-2010.pdf, acesso em 16/02/2018.
- [72] D. R. Penas, P. González, J.A. Egea, J.R. Banga, R. Doallo, “Parallel metaheuristics in computational biology: An asynchronous cooperative enhanced scatter search method,” *Procedia Computer Science*, vol. 51, pp. 630-639, 2015.
- [73] R. Martí, M. Laguna e F. Glover, “Principles of scatter search,” *European Journal of Operational Research*, vol. 169, no. 2, pp. 359-372, 2006.
- [74] M. Laguna e R. Martí, “Experimental testing of advanced scatter search designs for global optimization of multimodal functions,” *Journal of Global Optimization*, vol. 33, no.2, pp. 235-255, 2005.

- [75] L.M. Hvattum, A. Duarte, F. Glover e R. Martí, “Designing effective improvement methods for scatter search: an experimental study on global optimization,” *Soft Computing*, vol. 17, no. 1, pp. 49-62, 2013.
- [76] R. Martí, M. Laguna e V. Campos, “Scatter search vs. genetic algorithms: an experimental evaluation with permutation problems,” *Metaheuristic Optimization via Memory and Evolution: TS and SS*, C. Rego e B. Alidaee (Eds), Kluwer Academic Publishers, pp. 263-283, 2005.
- [77] J.M. Wilczewski e F. Sahin, “A hybrid genetic scatter search algorithm using genetic screening,” *Proceedings of the Fifth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control*, Famagusta, Cyprus, pp. 1-5, 2009.
- [78] J.A. Vasconcelos, J.H.R.D. Maciel e R.O. Parreiras, “Scatter search techniques applied to electromagnetic problems,” *IEEE Transactions on Magnetics* , vol. 41, no.5, pp 1804-1807, 2005.
- [79] C. E. R. Mercedes, “Análise de Estruturas Fotônicas por Elementos Finitos no Domínio da Frequência”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas– Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, São Paulo, Junho 2002.