



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

LUANA DA FRANÇA VIEIRA

Metaheurísticas no Projeto de Dispositivos de Óptica Integrada

TESE DE DOUTORADO

Salvador-Bahia

2022

Metaheurísticas no Projeto de Dispositivos de Óptica Integrada

Luana da França Vieira

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

Orientador: Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre

Salvador-Bahia

31 de dezembro de 2022

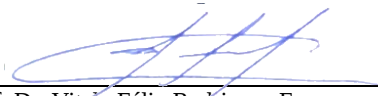
LUANA DA FRANÇA VIEIRA

METAHEURÍSTICAS NO PROJETO DE DISPOSITIVOS DE ÓPTICA INTEGRADA

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

APROVADA em 14 de outubro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



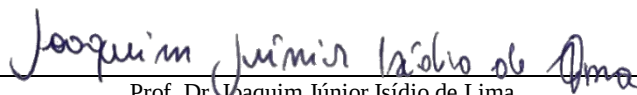
Prof. Dr. Vitaly Félix Rodriguez Esquerre
Orientador – UFBA



Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva Santos
IFSP



Prof. Dr. Gilliard Nardel Malheiros Silveira
UNICAMP



Prof. Dr. Joaquim Júnior Isídio de Lima
UNIVASP



Prof. Dr. José Patrocínio da Silva
UFRN

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

V657 Vieira, Luana da França
 Metaheurísticas no projeto de dispositivos de óptica
 integrada / Luana da França Vieira. -- Salvador, 2022.
 93 f. : il, color.

 Orientador: Vitaly Félix Rodríguez Esquerre.
 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal da
Bahia, Universidade Federal da Bahia - Escola
Politécnica, 2022.

 1. Metaheurística. 2. Otimização . 3. Guias de
ondas. 4. Curvaturas. 5. Cruzamentos. 6. Óptica
integrada. 7. Métodos numéricos. 8.
Telecomunicações. I. Rodríguez Esquerre, Vitaly
Félix. II. Universidade Federal da Bahia - Escola
Politécnica. III Título.

CDD 621.3

Resumo

Este trabalho tem como objetivo investigar e otimizar guias de ondas bidimensionais com curvatura de 90° e cruzamento 2×2 , compostos de silício e sílica. As seguintes metaheurísticas adaptadas são aplicadas: Algoritmo Memético, Enxame de partículas, Lobo cinzento e o híbrido (Procedimento de Busca guloso, Aleatório e Adaptativo juntamente com o Recozimento Simulado), (a) a modelagem ocorre pelo método de elementos finitos – 2D, em que os objetivos das otimizações consistem em reduzir as perdas de potência e diversificar as possibilidades de configurações de dispositivos, com a finalidade de maximizar a eficiência de transmissão de potência. (b) Os parâmetros geométricos das estruturas são otimizados, considerando características particulares das restrições das estruturas e dos algoritmos utilizados, sendo assim os resultados foram estudados, para compreender a interação entre a geometria das estruturas e os seus desempenhos associados. Foram alcançados valores de eficiência de transmissão acima de 95,76%.

Palavras-chave: Metaheurística, Otimização, Guias de Ondas, Curvaturas, Cruzamentos, Óptica Integrada, Métodos Numéricos e Telecomunicações.

Abstract

This work aims to investigate and optimize two-dimensional waveguides with 90° bend and crossing 2×2 compounds of silicon and silica. The following adapted metaheuristics are applied: Memetic Algorithm, Particle Swarm, Gray Wolf and the hybrid (Greedy, Random and Adaptive Search Procedure together with Simulated Annealing) (a) modeling occurs by the Element Method Finite – 2D, in which the optimization objectives are to reduce power losses and diversify the possibilities of device configurations, in order to maximize power transmission efficiency. (b) The geometric parameters of the structures are optimized, considering particular characteristics of the restrictions of the structures and the algorithms used, so the results were studied, to understand the interaction between the geometry of structures and their associated performances. Transmission efficiency values above 95,76% were achieved.

Keywords: Metaheuristics, Optimization, Waveguides, Bends, Crossings, Integrated Optics, Numerical Methods and Telecommunications.

Agradecimentos

O processo de aprendizado é algo, que demanda muita dor, mas a continuidade desse desenvolvimento re-torna muitas alegrias e só foi possível graças a Deus, primeiramente e, aos maiores amores da minha vida: Maria Crispiniana da França Vieira (in memoriam), Soraia da França Vieira, Joventino Antonio Vieira e Terezinha de Jesus Vieira.

Ao Prof. Dr. Vitaly Felix Rodriguez Esquerre, que devo todo o meu respeito, pelos incentivos diários, por acreditar que seria possível a evolução dos trabalhos desenvolvidos e pelas milhares de horas dedicadas às minhas dúvidas.

Ao Prof. Dr. Cosme Eustaquio Rubio Mercedes, que foi essencial no processo de construção deste trabalho, com todo seu apoio, análise, envio de dados e ensinamentos constantes.

Ao Prof. Dr. Jês de Jesus Fias Cerqueira e ao assistente administrativo Jaime Rodrigues Neto da Escola Politécnica da UFBA pela prontidão nos retornos das solicitações da pós-graduação.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Telecomunicações da Escola Politécnica da UFBA, Priscila Oliveira, Diego Souza Bezerra, Juarez Caetano, Igor Souza, Anderson Sisnando, Davi Rêgo, Rafael Andrade, Thiale Moura, Viviane Mercosul e Pedro Paulo pelas trocas diárias de conhecimentos.

Aos meus grandes amigos da vida, Simone Silene Dias Seabra, Charlisson Mendes Gonçalves, Miriele Carvalho Paim, Ícaro Almeida Sampaio, Túlio Freitas Simões de Castro, pelos incentivos constantes para dar continuidade a esse trabalho e principalmente por estarem dispostos a sempre me escutar em momentos difíceis.

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1 Motivação	12
1.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Justificativa	14
1.4 Estruturas utilizadas no projeto	17
1.5 Organização	18
2. Estado da arte sobre dispositivos de óptica integrada	19
2.1 Introdução	19
2.2 Estudos com guias de ondas com curvatura (<i>Bend</i>)	21
2.3 Estudos com guias de ondas com cruzamento (<i>Crossing</i>)	25
3. Detalhamento das Estruturas utilizadas	29
3.1 Estrutura inicial do guia de ondas com curvatura 90°	29
3.2 Estruturas iniciais dos guias de ondas com cruzamento 2×2	31
4. Algoritmos de Otimização, Materiais e Métodos	35
4.1 Materiais e Métodos	37
4.2 AM (Algoritmo Memético)	41
4.3 PSO (Otimização por enxame de partículas)	45
4.4 LC (Lobo Cinzento)	48
4.5 GRASP (Procedimento de Busca Guloso, Aleatório e Adaptativo)	52
4.6 RS (Recozimento Simulado)	54
4.7 Híbrido GRASP e RS adaptado	56
5. Resultados Numéricos	59
5.1 Algoritmo AM para o guia de ondas com curvatura	59
5.2 Algoritmo híbrido para o guia de ondas com curvatura	64
5.3 PSO para o guia de ondas com cruzamento	70
5.4 Algoritmo de LC aplicado ao guia de ondas com cruzamento	74
5.5 Algoritmo híbrido do GRASP juntamente com o RS	77
6. Conclusão	82

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquemático do guia com curvatura de 90° com a cavidade ressonante, baseada no trabalho [15].	17
1.2	(a) Estrutura de cruzamento anterior ao processo de otimização, baseada no trabalho [50]. e (b) pontos a serem otimizados, com a restrição de simetria de 90°.	17
1.3	(a) Modelo de estrutura de cruzamento usado como estrutura inicial para otimização, baseada no trabalho [50] e (b) Pontos alterados no processo de otimização.	18
3.1	Esquemático do guia com curvatura de 90° com a cavidade ressonante, baseada no trabalho [15].	30
3.2	(a) Estrutura de cruzamento anterior ao processo de otimização, baseada no trabalho [50]. e (b) pontos a serem otimizados, com a restrição de simetria de 90°.	31
3.3	(a) Modelo de estrutura de cruzamento usado como chute inicial para otimização, baseada no trabalho [50] e (b) Pontos alterados no processo de otimização.	33
4.1	Fluxograma do Funcionamento dos Projetos	39
4.2	Malha utilizada para a curvatura.	40
4.3	(a) Malha utilizada para o cruzamento de 4 pontos e (b) Ampliação da malha na região do cruzamento de 4 pontos.	41
4.4	Fluxograma do AM adaptado.	43
4.5	Fluxograma do PSO adaptado.	47
4.6	Diagrama esquemático das etapas do algoritmo LC adaptado.	50
4.7	Fluxograma do Algoritmo Híbrido	57
5.1	(a) Evolução da eficiência de transmissão, em relação ao número de gerações, para as melhores soluções do AM, quando consideradas populações de 10, 20 e 30 indivíduos, utilizando o comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. e (b) Potências de transmissão para comprimentos de onda na faixa de 1500 nm a 1700 nm, considerando também as 3 populações.	60
5.2	Relação entre a eficiência de transmissão e o número de gerações para AM e mutação adaptativa com condições diferentes, para verificação de convergência.	61
5.3	Distribuição espacial do campo elétrico obtida pelo AM, considerando as populações de (a) 10 indivíduos, (b) 20 indivíduos e (c) 30 indivíduos, respectivamente.	63
5.4	Relação entre o número de gerações e a eficiência de transmissão, considerando a estrutura da curvatura com o algoritmo híbrido, para (a) $\mu=0,43$ (b) $\mu= 0,78$ e (c) $\mu= 0,9$	65

5.5	Relação entre a eficiência de transmissão e o número de gerações para algoritmo híbrido, para verificação de convergência.	66
5.6	Distribuição espacial do campo elétrico da estrutura otimizada para (a) $\mu=0,43$ (b) $\mu=0,78$ e (c) $\mu=0,9$, obtida pelo algoritmo híbrido.	67
5.7	Relação entre os comprimentos de onda e a eficiência de transmissão.	68
5.8	Relação entre os comprimentos de onda e a eficiência de transmissão para a curvatura e usando o algoritmo híbrido, considerando cada indivíduo.	69
5.9	(a) Evolução das gerações de partículas e as eficiências de transmissão associadas, usando o comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. (a) $c_1 = 1$ e (b) $c_2 = 1,1$	70
5.10	Eficiência de transmissão em função das gerações.	71
5.11	Cruzamento otimizado com (a) $c = 1,0$ e (b) $c = 1,1$	72
5.12	Distribuição espacial do campo elétrico para o cruzamento otimizado com (a) $c = 1$ (b) $c = 1,1$ obtida pelo PSO.	73
5.13	Eficiência de transmissão em função do comprimento de onda.	73
5.14	Evolução dos lobos em função das gerações.	74
5.15	Evolução da eficiência de transmissão para o lobo cinzento, para verificação de convergência.	75
5.16	Geometria do guia de ondas de cruzamento otimizado Ponto 1 $(-2,45 \mu\text{m}, 0,20 \mu\text{m})$, Ponto 2 $(-1,61 \mu\text{m}, 0,14 \mu\text{m})$, Ponto 3 $(-0,61 \mu\text{m}, 0,11 \mu\text{m})$, Ponto 4 $(-0,19 \mu\text{m}, 0,12 \mu\text{m})$	75
5.17	Distribuição do campo obtida após a otimização.	76
5.18	Eficiência de transmissão em função do comprimento de onda.	76
5.19	Eficiência de transmissão em função do número de gerações para (a) $\mu=0,34$ (b) $\mu=0,51$ e (c) $\mu=0,82$	78
5.20	Distribuição espacial do campo elétrico obtida pelo algoritmo híbrido para (a) $\mu=0,34$ (b) $\mu=0,51$ e (c) $\mu=0,82$	79
5.21	Relação entre comprimentos de onda no intervalo entre $1,5-1,6 \mu\text{m}$ e eficiência de transmissão.	80
5.22	Relação entre comprimentos de onda no intervalo entre $1,5-1,6 \mu\text{m}$ e eficiência de transmissão, para cada um dos 10 melhores indivíduos.	80
5.23	Relação entre número de gerações e eficiência de transmissão para verificação de convergência do algoritmo híbrido.	81

LISTA DE TABELAS

3.1	Intervalos escolhidos para a curvatura	30
3.2	Intervalos escolhidos para o cruzamento de 2 pontos.	32
3.3	Intervalos escolhidos para o cruzamento de 4 pontos.	34
4.1	Solução gerada antes da busca local.	44
4.2	Solução gerada após a busca local.	45
5.1	5 pontos e população 10.	62
5.2	5 pontos e população 20.	62
5.3	5 pontos e população 30.	62
5.4	5 pontos, população 10, mutação adaptativa com condições diferentes	62
5.5	5 pontos e população 10.	64
5.6	Para $c = 1,0$	71
5.7	Para $c = 1,1$	72
5.8	Parâmetros encontrados com LC	76
5.9	Parâmetros encontrados em $\mu=0,34\mu\text{m}$	77
5.10	Melhores eficiências de transmissão para cada Estrutura e Algoritmo	81

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
AM	Algoritmo Memético
PSO	Otimização por enxame de partículas
LC	Lobo Cinzento
GRASP	Procedimento de Busca Guloso, Aleatório e Adaptativo
RS	Recozimento Simulado
MEF	Método de Elementos Finitos
FDTD	Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
SOI	Silício sobre isolante

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A necessidade dos dispositivos fotônicos para atender à demanda dos setores de comunicação e computação torna-se cada vez mais presente e a análise do processamento óptico de informações pode contornar barreiras de limitação de velocidade e largura de banda [1]. As estruturas base de dispositivos como *lasers*, amplificadores Raman, detectores, moduladores e multiplexadores de comprimento de onda, são feitas de guias de onda retos e curvos [2], o que evidencia a importância do estudo desses dispositivos.

Esses dispositivos atuam como base para circuitos integrados fotônicos, os quais proporcionam uma maior taxa de transferência de dados, menor consumo de energia e uma maior largura de banda, quando comparados aos circuitos integrados tradicionais [3,4].

A busca por estruturas fotônicas, capazes de maximizar a transferência de potência, pode ser automatizada, por projeto inverso, técnica capaz de explorar o espaço de projetos factíveis de dispositivos, onde os critérios de desempenho podem ser inseridos pelo projetista para que os algoritmos de otimização adotados sejam capazes de auxiliar na busca por dispositivos que atendam às especificações de projeto [5]. Uma maior quantidade de projetos de dispositivos foi permitida devido ao projeto inverso nanofotônico [6–11]. É importante ressaltar que não há garantia de encontrar a solução globalmente ideal, uma vez que o universo de projetos possíveis é infinito e seria inviável colocar todas as possibilidades de estruturas a serem testadas, devido ao custo computacional para processar todas as possibilidades de configurações de estruturas. Mesmo com tais limitações, configurações aceitáveis e com bons desempenhos são possíveis de descobrir, ao aplicar técnicas de projeto inverso [12] e em algumas situações, até mesmo encontrar o ideal.

O projeto inverso fornece um novo entendimento, para reduzir limitações de desempenho em sistemas fotônicos, ampliar o uso de métodos em aplicações práticas, explorar o espaço de dispositivos fabricáveis e até mesmo abrir a possibilidade de questionar o potencial de um dispositivo fotônico. O cenário dos dispositivos nanofotônicos foi transformado, com os estudos de projeto inverso computacional. Novos dispositivos são avaliados, a partir de uma configuração inicial de teste e é verificado, se os dispositivos atuam como esperado e se as propriedades funcionais são obedecidas, caso contrário, o processo é reiniciado, com a adoção de outras estratégias como por exemplo a alteração de parâmetros geométricos [12].

Existe uma demanda na área de tecnologia fotônica para que o desempenho de componentes ópticos seja

melhorado e que sejam considerados, não menos importantes, aspectos como: as condições de fabricação e os prazos de projeto relacionados. Tais fatores são influenciados pela escolha das técnicas para modelagem e otimização de dispositivos, uma vez que podem reduzir problemas associados a recursos e prazos para fabricação de dispositivos.

Com o desenvolvimento dos estudos relacionados à fotônica, houve uma mudança na forma como a infraestrutura da informação estava sendo gerenciada, pois trouxe uma nova compreensão de fenômenos ópticos e dessa forma a possibilidade da construção de novos dispositivos de forma diferenciada. Assim é o que procede na sequência, investigações sobre tecnologias de comunicações ópticas em escalas menores [13]. A nanofotônica tem despertado interesse frequente das pesquisas, impulsionada pela descoberta de tecnologias em nanoescala [14]. Para alcançar bons resultados, a associação do estudo de fotônica com a construção de algoritmos inteligentes pode ter um impacto significativo no avanço dessas tecnologias. [15–26].

À medida que as demandas por dispositivos nanofotônicos crescem, o desenvolvimento de algoritmos de otimização torna-se cada vez mais necessário, pois essas técnicas auxiliam na exploração do espaço de busca de forma mais inteligente [14]. O uso de ferramentas computacionais mais sofisticadas é fundamental aos projetos promissores de otimização de guias de ondas ópticos, uma vez que demandam um grande poder de processamento para simulação e modelagem de estruturas [27]. Uma das aplicações desses instrumentos tecnológicos está na simulação da propagação de ondas em um determinado meio utilizando métodos numéricos para a resolução de equações e também o processamento de estruturas, sendo que ambas estratégias demandam rotinas computacionais custosas em processamento e armazenamento de dados [16].

Profissionais de engenharia têm sido atraídos pelo uso de algoritmos metaheurísticos inspirados na natureza e que simulam comportamentos de populações de indivíduos, para solucionar problemas de otimização. Por exemplo, em algum momento da atuação profissional, pode ser necessário encontrar a melhor solução possível, dentro de um conjunto de soluções disponíveis, ou que seja necessária a minimização de custos ou tempo, ou até mesmo a maximização do lucro. Essa ideia está relacionada ao conceito de otimização, onde em um mundo diverso de possibilidades, deve-se optar pela escolha aceitável ou algo que se aproxime da melhor escolha [28, 29]. Entre as razões para utilização dessas técnicas estão a facilidade de implementação e a adaptação a diferentes tipos de problemas [28].

As metaheurísticas são ferramentas que fazem uso de estratégias capazes de resolver problemas combinatórios. Se houver uma configuração adequada de parâmetros, o método de descobertas pode ter seu desempenho melhorado. Portanto, é essencial que sejam realizados testes para verificação de parâmetros que atendam a aplicação de interesse [30, 31].

A inclusão de mais parâmetros geométricos no projeto de componentes nanofotônicos pode levar a uma menor área ocupada pelo dispositivo e desempenho superior. A qualidade de projetos pode ser reduzida,

devido à incapacidade de investigar parâmetros manualmente e da impossibilidade de descobrir intuitivamente dispositivos com baixa perda. Para evitar problemas como esses, foram implementadas técnicas de otimização capazes de explorar uma grande quantidade de parâmetros relacionados à estrutura do dispositivo analisado [6].

O objetivo de um problema de otimização global é buscar um ponto x e uma $f(x)$, sobre um determinado domínio, em que as restrições sejam atendidas e que o valor de x minimize ou maximize a função $f(x)$, a depender do caso tratado em questão. Tal função é denominada função objetivo ou função de custo, sendo ela uma representação quantitativa da eficiência do sistema avaliado [28, 32]. A avaliação de uma função objetivo $f(x)$ nesse tipo de problema não é uma tarefa fácil e para sua análise são necessárias verificações das informações disponíveis no problema e relações entre entradas e saídas.

A otimização geométrica é uma metodologia com base em um processo cíclico, no qual é possível descobrir uma distribuição de elementos da estrutura, que maximiza ou minimiza uma função objetivo [33, 34]. Tal processo tem como base elementos finitos e refina distribuições considerando as restrições e função objetivo, além de proporcionar ao projetista uma variedade geométrica maior, onde cada elemento da malha pode ser uma variável do projeto [34]. O uso de algoritmos de otimização é um dos meios para alcançar novas possibilidades de topologias desses dispositivos [35]. A técnica de otimização de topologia é uma alternativa para alcançar estruturas de dispositivos ideais, através de uma configuração inicial de parâmetros e da geração de características do dispositivo, por tais motivos, tal técnica tem atraído atenção dos pesquisadores [36].

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Otimizar guias de ondas curvos de 90° ;
- Otimizar guias de onda com cruzamentos 2×2 ;
- Adaptar as metaheurísticas já existentes para atender cada estrutura ;
- Publicar resultados inéditos dessa pesquisa.

1.3 Justificativa

A escolha pelo uso das metaheurísticas aplicadas neste trabalho surgiu da necessidade de encontrar soluções para problemas em que não há um conhecimento prévio de configurações de estruturas, com o objetivo de maximizar a transferência de potência e dessa forma, não seria possível uma busca por tentativa e erro,

fazendo uma varredura dos valores dos parâmetros, uma vez que a quantidade de soluções possíveis é computacionalmente inviável de ser processada. Já a escolha das configurações de estruturas utilizadas nas metaheurísticas é fundamentada na tentativa de escolher geometrias apresentadas na literatura que apresentam eficiências altas e dessa forma foram propostas estruturas candidatas a passarem pelo processo de otimização, além disso devido à presença de ressonância, essas geometrias podem alterar o formato do modo, ao longo da propagação.

Além de focar no uso de metaheurísticas, este trabalho explora os espaços de busca, com estratégias adaptadas e de acordo com as necessidades de cada aplicação proposta, ou seja, não se limita a adotar as metaheurísticas na sua forma clássica e melhora a inteligência de busca, uma vez que é essencial trabalhar cada problema, em suas minúcias. Cada problema eletromagnético analisado neste trabalho tem suas especificidades, por isso a necessidade de particularizar os algoritmos.

Todas as metaheurísticas utilizadas neste trabalho têm a possibilidade de realizar variações nas geometrias das estruturas, o que pode levar a verificar diferentes valores de eficiência de transmissão associadas. É possível trabalhar com muitas soluções candidatas de uma só vez, logo a possibilidade de ficar preso em um extremo local é inferior a outros métodos tradicionais determinísticos. Já a desvantagem está em relação ao tempo computacional, pois cada solução deve ser avaliada em todas as iterações, o que torna a execução mais lenta [37].

A escolha das metaheurísticas deste trabalho é devido a não trivialidade de controlar de maneira exata o tamanho do espaço de busca e por não ter algoritmo que encontre uma solução ótima comprovadamente [37]. As regiões mais promissoras do espaço de busca são direcionadas por meio dos operadores dos algoritmos de otimização. Tais operadores são organizados com base em condições do problema de aplicação. Quanto mais opções na vizinhança dos melhores pontos maior será a possibilidade de encontrar melhores soluções. Informações adquiridas por gerações passadas podem auxiliar na construção de informação sobre cada tipo de problema e simplificar a busca por soluções [38].

À medida que os ângulos arbitrários são incluídos na geometria do cruzamento de guias de ondas, a complexidade de integração do circuito é ampliada e dessa forma é importante encontrar métodos para flexibilizar o roteamento de um circuito fotônico integrado [39]. O guia de ondas óptico é usado para conexão de componentes e permite a propagação de luz, com baixa perda [40].

Os métodos tradicionais ao serem aplicados a projetos de dispositivos resultam em um bom desempenho, embora associados a áreas ocupadas pelos dispositivos muito grandes, o que traz um efeito desfavorável na integração densa. Além disso, para que sejam configurados esses dispositivos, a combinação de métodos simples com a análise do projetista pode auxiliar na investigação manual, tal associação gera novas possibilidades de projeto e mais opções de dispositivos a serem avaliados. Dessa forma, torna-se essencial o uso de

outros métodos tais como AM [41], PSO [42], LC [43], GRASP [44], RS [45] para projetos de cruzamentos e curvas de guias de ondas, o que pode reduzir a área ocupada pelos dispositivos e gerar desempenhos superiores [46].

Ao utilizar o AM, a população de indivíduos é evoluída, onde os operadores genéticos são empregados para criação de novos indivíduos e esses são aproximados do seu máximo local através da busca local, o que pode gerar candidatos muito melhores para serem submetidos a novas avaliações. As operações com os operadores, tais como de recombinação e mutação geram alterações nas estruturas, sendo possível proporcionar geometrias com eficiências de transmissão maiores do que as já encontradas na estrutura base, através das substituições dos piores indivíduos/estruturas gerados, tais atualizações são essenciais para encontrar geometrias associadas a diferentes valores de eficiência e conseguir realizar mais comparações [47].

Ao comparar o algoritmo PSO com outras técnicas é possível verificar a vantagem de não demandar um conhecimento prévio de modo intuitivo das regiões mais favoráveis do espaço de busca ou de ter bons pontos de partida. Além de não depender do tipo do problema a ser aplicado, pois a única informação para execução do algoritmo é avaliar cada solução candidata, através da função de avaliação e respeitar as restrições associadas [48]. As partículas são posicionadas representando pontos no espaço de busca e cada movimentação pode gerar novas possíveis soluções, ampliando a combinação de novas possibilidades pra encontrar melhores soluções.

O comportamento de caça e busca de alguns animais é imitado por algoritmos de inteligência de enxame, embora no LC existe uma simulação de hierarquia de liderança entre lobos e através de um processo de busca, o local onde está posicionada a melhor solução pode ser avaliado a partir de um conjunto de três soluções, no lugar de pesquisar a melhor solução através da liderança de apenas uma única solução [43]. As posições dos lobos são atualizadas e o distanciamento entre as soluções geradas é avaliado.

Uma das vantagens do GRASP em relação a um algoritmo genético, por exemplo, está na utilização de tempo de CPU muito menor [49]. O que diferencia o algoritmo dos demais é a utilização de um parâmetro capaz de determinar a cardinalidade de uma lista restrita de candidatos à solução e com isso é possível ter um controle maior sobre a quantidade de elementos que ficará a cada iteração e através de uma função gulosa, os elementos dessa lista são avaliados e posteriormente comparados entre si [44].

Em relação a outros métodos, a principal vantagem do RS é conseguir evitar ficar preso em mínimos locais, uma vez que ele utiliza uma busca aleatória que não apenas aceita alterações na função objetivo que sofre aumento, mas também em que seus valores são reduzidos, de acordo com funções probabilísticas e com um parâmetro de temperatura, que é variado, para aceitar ou rejeitar as soluções encontradas [45].

Uma vez que já foram encontrados resultados satisfatórios com a quantidade de execuções realizadas,

optou-se por ampliar o conhecimento em outros algoritmos de otimização e por isso não foi adotada a mesma quantidade de execuções para todos os algoritmos.

1.4 Estruturas utilizadas no projeto

As geometrias das Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 foram utilizadas durante o desenvolvimento dos projetos e são detalhadas no Capítulo 3 deste trabalho.

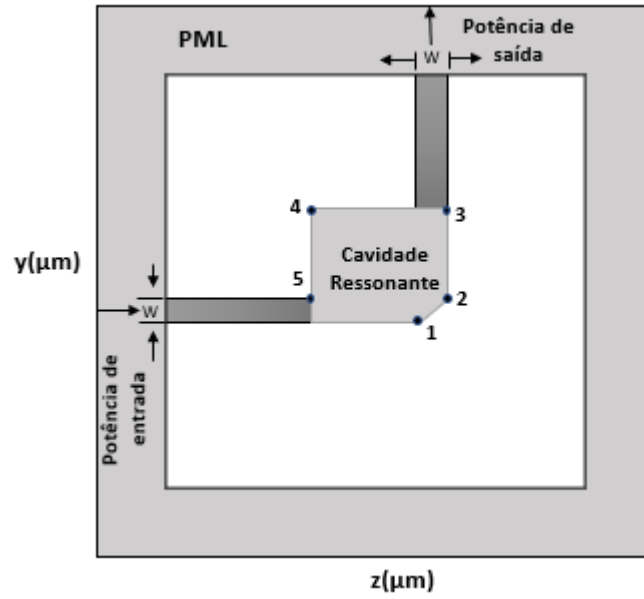


Fig. 1.1: Esquemático do guia com curvatura de 90° com a cavidade ressonante, baseada no trabalho [15].

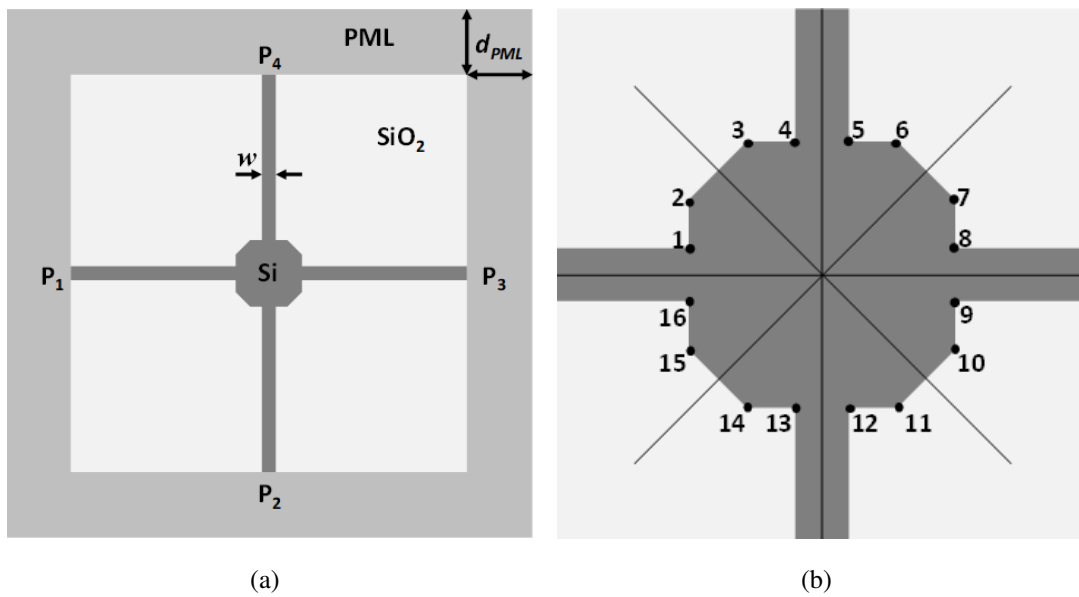


Fig. 1.2: (a) Estrutura de cruzamento anterior ao processo de otimização, baseada no trabalho [50]. e (b) pontos a serem otimizados, com a restrição de simetria de 90°.

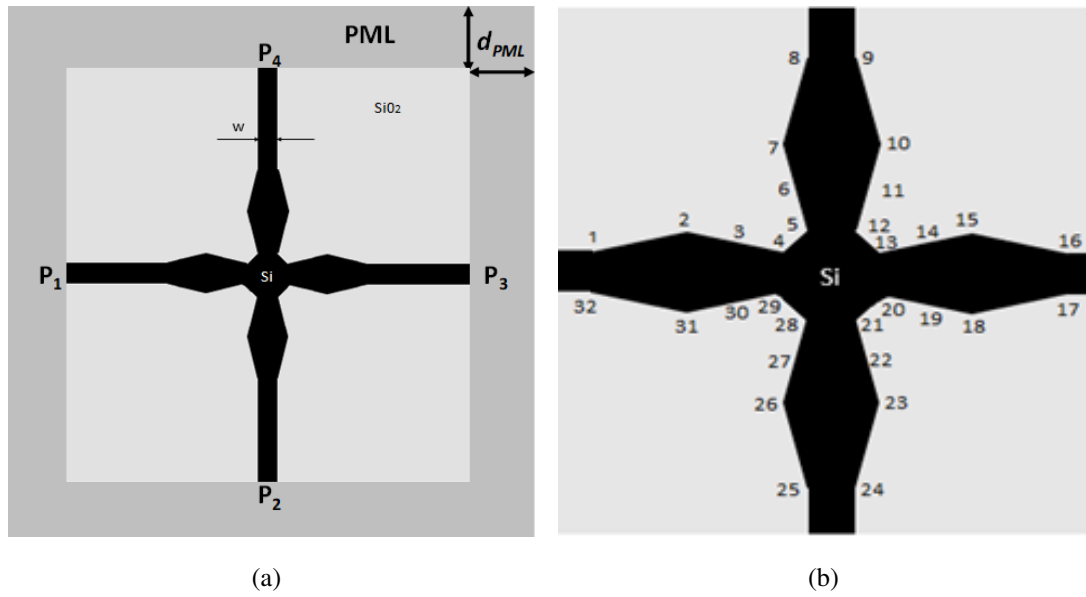


Fig. 1.3: (a) Modelo de estrutura de cruzamento usado como estrutura inicial para otimização, baseada no trabalho [50] e (b) Pontos alterados no processo de otimização.

1.5 Organização

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 1 destina-se a apresentar motivações, objetivos gerais e específicos, apresentação das estruturas utilizadas no trabalho e justificativas para a realização dos projetos. O Capítulo 2 apresenta o estado da arte sobre os dispositivos de óptica integrada, que foram desenhados e otimizados, além de trazer os métodos usados na literatura para melhoramento dessas configurações. No Capítulo 3 são apresentadas as geometrias iniciais da curvatura e dos cruzamentos utilizadas para o processo de otimização. No Capítulo 4 são detalhados os algoritmos de otimização e passos, que foram aplicados em cada uma das estruturas dos projetos e também são elucidadas as vantagens de cada um deles, além da apresentação dos materiais e métodos utilizados para os projetos desse trabalho. No Capítulo 5, os resultados numéricos das estratégias utilizadas para otimização dos dispositivos são destacados e comentados e no Capítulo 6 são retomadas as ideias mais relevantes deste trabalho, assim como as consequências alcançadas e são levantadas propostas para futuros trabalhos.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE DISPOSITIVOS DE ÓPTICA INTEGRADA

2.1 *Introdução*

No presente tópico é realizada uma revisão sobre o estado da arte que serviu ao embasamento de desenvolvimento dos dispositivos, uma vez que trazem informações de fundamental importância sobre trabalhos realizados com guias de ondas com curvatura e cruzamentos. Para isso, são abordados tipos de geometrias utilizados, valores de eficiência de transmissão alcançados, estratégias utilizadas para obtenção de desempenho desejado e faixas de comprimento de onda. Os trabalhos analisados apresentam a proposta de reduzir o tamanho do dispositivo fotônico em plataformas de semicondutores comerciais, gerando circuitos inovadores e também a redução de custos financeiros.

Guias de onda com curvatura têm sido estudados desde 1969 por Marcatili [51] com a variação de materiais e metodologias para alcançar resultados, tanto no desempenho, como na compreensão de seus comportamentos. Muitos outros trabalhos foram realizados após mais de 50 anos dessa publicação, com a finalidade de estudar o comportamento da propagação em um guia de ondas curvado. Para exemplificação dos trabalhos, guias de onda com curvatura são determinantes na construção de circuitos ópticos integrados [52, 53]. Os guias são usados para diversas funcionalidades, como para atuar na mudança das direções de propagação, inserir deslocamentos laterais, e na operação com rotadores de polarização [52, 54].

Muitos estudos sobre a análise e projeto de guias de ondas com curvatura [15–26] têm sido considerados por serem estruturas eficazes no acoplamento de potência, sendo os guias de ondas com curvatura como sendo elementos relevantes em circuitos em óptica integrada, uma vez que são estruturas básicas para conexões entre componentes ópticos [15, 55].

Um aumento nos investimentos em indústria e pesquisa ocorreu em dispositivos de fotônica de silício [3]. As propriedades do silício o torna um material adequado para chips de memória, uma vez que ele pode funcionar como condutor ou isolante, com isso, é capaz de gerar alimentação para dispositivos portáteis, além de ser um material que possui quantidade significativa na natureza, o que abre espaço para diversas aplicações de sistemas fotônicos [3, 56–58].

Cruzamentos ópticos apresentam expressiva relevância para reduzir a complexidade de construção de circuitos densos [59, 60]. O processo de otimização contribuiu para redução das perdas, com as mudanças dos parâmetros do projeto [59]. Entre os benefícios de topologias em formato de cruz estão os seguintes: a

possibilidade de aplicação de fórmulas analíticas e a simplicidade da configuração [61].

Cruzamentos de guias de ondas ultracompactos são fundamentais para concretizar o poder da fotônica de silício para conexões em chip óptico integrado [4]. A existência do cruzamento do guia de onda torna-se decisiva à medida que as aplicações em fotônicas integradas ao chip aumentam, tais como roteamento óptico e comutação [50]. Esforços vêm sendo realizados por cientistas para atingir circuitos ópticos integrados de alto desempenho com o projeto para cruzamentos de guias de onda [39, 61–63]. Métodos de projeto inverso foram abordados para otimização de estruturas com cruzamento [4, 12, 64, 65], a técnica tem chamado atenção de pesquisadores, pela sua diversidade de aplicações [6, 46, 66, 67].

O fluxo de onda eletromagnética pode ser guiado por um guia de ondas, o qual pode ser confinado internamente ou nas regiões vizinhas às superfícies. Para compreensão do comportamento da propagação da luz em um guia de ondas é necessário proceder a derivação da equação de onda. Tal equação pode ser derivada da equação de Maxwell 2.1 a 2.4, onde $\vec{E}$ e $\vec{H}$ são as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos, enquanto $\vec{B}$ e $\vec{D}$ são fluxos magnéticos e elétricos, respectivamente, ϵ é a permissividades elétrica e μ é a permeabilidade magnética do meio. As equações devem ser satisfeitas pelas soluções buscadas [40].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

A manipulação das expressões acima resulta a seguinte equação de onda [40]:

$$\nabla^2 \times \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \times \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.6)$$

Para realização da análise e caracterização de componentes de guias de ondas, o MEF tem sido utilizado na modelagem de geometrias de guias de ondas semelhantes às operadas em dispositivos práticos [68]. O método FEM é capaz de calcular soluções complexas, não apenas soluções reais, o que permite uma descrição do comportamento do dispositivo mais próxima do real [69].

2.2 Estudos com guias de ondas com curvatura (*Bend*)

Existem muitas aplicações em que é necessário alterar a direção da propagação da luz, tais como em circuitos ópticos, como os que são utilizados em interruptores, moduladores e acopladores [70] e para realizar essas modificações existem curvas de guias de ondas, que são estruturas utilizadas para redirecionamento da propagação de ondas eletromagnéticas dentro dos guias [70, 71], com isso é possível mudar a direção de sinais de alta frequência com perda mínima. Sendo assim, seguem por meio de itens, trabalhos realizados na literatura e de grande relevância na área associados a guias de ondas curvos.

- (a) Em [55] foi proposto um método por Neumann em 1986 para reduzir a perda de radiação em curvas de guias de onda monomodo através da desaceleração da frente de fase frontal, ou seja, foi inserido um “freio de onda” na parte interna da inclinação do guia de onda. A distribuição do índice de refração foi modificada em torno da inclinação para que a velocidade de fase local tivesse uma redução no lado interno da curvatura, se comparada com o lado externo. Para alteração do índice de refração foram utilizados dois paralelepípedos retangulares com as seguintes dimensões escolhidas 10 mm x 12 mm x 20 mm.
- (b) A perda por radiação é inerente em ramificações de regiões, devido à limitação no projeto de estruturas [72], embora seja possível reduzir tal perda pelo aumento do contraste do índice entre meio circundante e o guia. Estruturas de alto contraste possibilitam o projeto de componentes de guia de onda, que podem constituir ligações complexas dentro de uma pequena área ao considerar a característica de forte confinamento de luz [15]. Devido ao alto índice de contraste de refração da plataforma SOI (silício sobre isolante), o confinamento óptico estreito é permitido, com dimensões de centenas de nanômetros, típicas dos guias de ondas. O projeto de dispositivos compactos é muito facilitado pelo confinamento estreito [50, 73].
- (c) Posteriormente, em [15], foi considerado um guia de ondas de curvatura de 90° com estrutura ressonante, dimensões submicrônicas, características de alto confinamento, índice de refração de 3,2 e rodeados por ar e uma largura de guia de onda de 0,2 μm . Alcançou-se uma eficiência de transmissão de no máximo 98,6%. Foram otimizados a largura e o corte do ressonador por meio do FDTD (método das diferenças finitas no domínio do tempo) e utilizou-se o comprimento de onda de 1,55 μm . Com as ideias apresentadas neste trabalho, é possível incluir uma diversidade de estruturas ressonantes, para outros projetos de guias de ondas e observou-se que, a transmissão é influenciada por variações de tamanho do guia de ondas e dos ressonadores. Além disso, devido à dependência de polarização, de sistemas de alto índice de contraste, o desempenho do projeto é afetado. Quando não há perdas em um ressonador e existe uma simetria apropriada, onde as reflexões são canceladas e uma transmissão completa em ressonância. Por outro lado, quando há perdas no ressonador, uma reflexão é provocada e ocorre uma redução no pico de transmissão. Tal fato pode ser contornado ao otimizar o acoplamento entre os modos de guia da onda e do ressonador [15].

- (d) Um dos problemas dos guias de ondas dielétricos comuns está na restrição quanto aos seus raios de curvatura, uma vez que são limitados a milímetros por causa da degradação da reflexão interna total [20]. Para melhorar o desempenho da transmissão, há projetos que estão relacionados a guias de ondas que focaram na alteração da estrutura em torno da esquina da curva [20, 74, 75]. Através da atualização do desenho do canto da curva é possível reduzir as perdas de reflexão. Dessa forma, a modificação da geometria nos cantos da curvatura é um dos tratamentos mais habituais para melhorar o desempenho de dispositivos fotônicos [75].
- (e) Em sequência, no trabalho [20] investigaram e otimizaram uma curva de guia de ondas de 60° , analisando a sensibilidade realizada nos furos mais críticos da região da curvatura utilizando a estrutura planar de cristal fotônico com o sistema de guia de ondas de baixo índice de contraste, com InGaAsP / InP em $1,55 \mu\text{m}$ e alcançou-se uma eficiência de transmissão de até 96,8%. Foram utilizados os métodos MMP 2D (multiple multipole program), onde os modos próprios do guia de ondas e as condições de correspondência para as portas são apresentados, e o FDTD 3D (método das diferenças finitas no domínio do tempo) para validação do cenário de otimização, através das simulações. Os resultados alcançados são capazes de gerar mais credibilidade ao fabricar um dispositivo posterior.
- (f) Em [75] foram investigados guias de ondas com curvatura de 90° e para encontrar uma estrutura com desempenho superior da transmissão pelo aumento do número de hastes na curvatura e foi realizada comparação com 5 outras estruturas. Com isso, foram obtidos níveis de transmissão de 98% em uma largura de banda de 2,5 THz. O comportamento das estruturas foi avaliado por meio de simulações numéricas e considerando os parâmetros ótimos de constante de rede e raio, sendo que o MEF demonstrou ser eficaz para análise de estruturas complexas e para descrever a propagação de onda e a modificação no canto da curvatura mostrou-se eficaz para melhorar a transmissão.

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 projetá-los, pois há perdas de informação. 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. Em um guia de ondas com curvatura tal perda aumenta de forma perceptível e proporcional ao tamanho da curvatura, podendo gerar uma alteração da onda e variação no ângulo de incidência em relação à frente de onda e os limites dos guias de onda [16].

- (g) Levando em consideração as perdas de potência decorrentes de guias de ondas ópticos curvados, especificamente de 90° , em [16] foi proposta a utilização do Algoritmo Genético para otimização em que foram distribuídos índices de refração variáveis em divisões menores de uma estrutura quadrada, em determinada região, que faz conexão com guias de ondas retos e o algoritmo foi usado para encontrar a melhor distribuição nas áreas particionadas retangulares, com a finalidade de obter a estrutura que

forneça a menor perda. As características analisadas foram largura de $0,5 \mu\text{m}$ do guia de ondas e com índices de refração variando entre 1 e 3,5. Alcançou-se uma eficiência de transmissão de 97,22% pelo algoritmo de otimização modelando com o MEF utilizando-se o comprimento de onda de $1 \mu\text{m}$.

- (h) Outra restrição está associada ao raio de curvatura mínimo de um guia de ondas na redução da área ocupada pelo dispositivo e dos custos dos circuitos integrados fotônicos. Com isso, é possível usar raios de curvatura na escala de μm para guias de ondas de alto índice de contraste [76]. Circuitos baseados em guias de onda de alto índice de contraste com integração mais densa e menores raios de curvatura foram analisados em [77–79]. Aumentar a diferença do índice de refração entre o núcleo do guia de onda e o material de revestimento ao lado dele, ou seja, aumentar o contraste do índice lateral é a forma mais eficiente de reduzir o raio de curvatura mínimo de um guia de onda [51, 76].
- (i) Para comprovar o quão altamente dobráveis são guias de ondas de alto contraste de índice de refração para propagação em modo único e considerando núcleos em escala micrométrica, em [76] foram apresentadas simulações e experimentos com curvas de guias de onda de 90° com perdas para o modo fundamental abaixo de $0,02 \text{ dB}/90^\circ$ e sua aplicação é justificada para uma banda ultra-larga de operação para raios de curvatura abaixo de $10 \mu\text{m}$, em amplas faixas de comprimento de onda. Além disso, foi possível realizar curvas de 180° com perdas de $0,09 \text{ dB}$ e raios efetivos de $1,27 \mu\text{m}$. Os resultados possibilitam a integração para a maioria das plataformas de semicondutores.
- (j) Posteriormente, em [74] avaliaram um guia de ondas curvado de cristal fotônico 120° e de rede triangular, onde foram inseridos defeitos estruturais na região da curvatura do guia de ondas e foi aplicada uma análise de sensibilidade nos parâmetros do projeto. As simulações foram realizadas com a utilização do método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) 3D e alcançou-se 94.3% de transmissão de saída normalizada, com comprimento de onda de 1550 nm . Com o estudo realizado foi possível compreender a tolerância no erro de fabricação e propor a curva obtida para utilização em circuitos integrados fotônicos.
- (k) A metodologia para obter curvas de qualidade deve ser observada com muita cautela para o êxito nos resultados finais, como foi realizada no trabalho [25]. Inicialmente foi analisado o mecanismo de perda da curva, para que em sequência a otimização fosse efetivada e para tal, foram realizados ajustes na configuração das curvaturas, por meio de polinômios e para descobrir a melhor curva, os coeficientes polinomiais foram pesquisados, através de um método de direção aleatória modificado. Utilizou-se um guia de ondas com curvatura em forma de S. Os índices de refração do núcleo e do revestimento são 1,4553 e 1,4444, respectivamente. A largura e a altura da guia de ondas são $w = 5,5 \mu\text{m}$ e $h = 5,5 \mu\text{m}$. Quando $L = 400 \text{ nm}$, a perda de inserção da curva otimizada é de $0,3503 \text{ dB}$ e a

perda de inserção da curva em forma de cosseno é 1,2627 dB.

- (l) Além de alcançar transmissões de baixa perda, outro fator relevante para um projeto é a observação dos tempos para obtenção da função objetivo do trabalho [26] que teve preocupação com tal quesito e o projeto foi dividido em etapas. A princípio foi introduzido um guia de ondas convencional para maximizar a lacuna de banda fotônica e para acrescentar o raio de apenas um orifício perto da curva foi modificado no processo de otimização através do Método quase-Newton. Na sequência o MEF foi utilizado para obter as soluções de campo e a técnica da expansão em ondas planas (PWEM) para otimizar o intervalo da banda fotônica para um guia de ondas com curvatura de 120° em cristais fotônicos 2D. O índice de refração do silício é tomado como $n_{Si} = 3,476$ e alcançou-se uma eficiência de transmissão de 98,25% em 1550 nm. O trabalho pode ser ampliado para a construção de dispositivos ópticos 3D e sendo possível usar a metodologia abordada em novas aplicações.
- (m) A complexidade e os custos das pesquisas de projeto de guia de ondas estão crescendo, embora tenham como contrapartida a obtenção de dispositivos com melhores desempenhos. Em [2] são apresentados tais desempenhos com o desenvolvimento de guia de ondas com curva S, em um comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$, com dimensão do guia de onda de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, em que foram variados e selecionados parâmetros de deslocamento lateral e deslocamento em S para otimizar o desempenho do guia de onda e reduzir perdas. O resultado obtido foi de uma máxima potência de 95.81% e com deslocamento lateral ideal de $2,7 \mu\text{m}$. Foi utilizado o método de propagação de feixe (BPM) através do software OptiBPM, que é baseado nesse método.
- (n) Outra solução competitiva é apresentada em [80] para minimizar as perdas e a interferência entre modos através de uma curva de guia de onda de 90° multimodo, tomando por base curvas de Euler modificadas e com a escolha adequada dos raios de curvatura. No estudo em questão, duas curvas de 45° formam uma curva de 90° na plataforma de silício sobre isolante (SOI) com um raio efetivo que representa cerca de 1/16 do tamanho de uma curva de arco regular de 90° , tão pequeno quanto $45 \mu\text{m}$ e a largura do guia de ondas escolhida foi de $2,36 \mu\text{m}$, operando no comprimento de onda de 1550 nm. Para simular a propagação de ondas o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) é utilizado. Com o uso das curvas de Euler, foi possível reduzir as perdas $< 0,5 \text{ dB}$ e *crosstalks* intermodais $< -20\text{dB}$ para 4 canais de modo de polarização TM, em uma banda larga de 1520 nm a 1610 nm e uma redução de área ocupada em torno de 1/16, se comparada a curva de arco regular de 90° . Além disso, a fabricação é mais simples e de tais curvas não serem sensíveis às variações de largura e altura do núcleo, ao considerar a curva devido ao *design* adiabático. Com todas essas vantagens relatadas, é possível aproveitar o projeto para uma quantidade de canais e também para a polarização TE e otimizar o raio de curvatura e a largura do núcleo.

- (o) As perdas resultantes da passagem do modo de guia de onda reto para o guia com curvatura são equilibradas por meio da geometria de curva de Euler parcial otimizada e de ferramentas que trazem elementos adicionais para reduzir a perda ao longo da curvatura. Tal análise é abordada em [81], onde foram otimizadas e fabricadas curvas de Euler parciais de 90° , em uma plataforma de nitreto de silício em um comprimento de onda de 850 nm. A otimização possibilitou redução do raio efetivo sem gerar um aumento na perda total da curvatura e, dessa forma, gerar uma alta densidade de componentes em circuitos integrados fotônicos. Para criação de deslocamentos laterais foram apresentadas análises numéricas para curvas de 45° , 90° e 180° para determinar a potência e a radiação modal nas geometrias de curvatura parcial de Euler operadas na polarização TM, através do método de expansão do modo e através da otimização foi possível obter os parâmetros ideais das curvaturas. Pelos resultados obtidos, no estudo em questão, foi possível observar que em cada sistema de guia de ondas o equilíbrio entre o comprimento total da curva e a seção de Euler deve ser determinado individualmente.
- (p) A proposta de um modelo de guia de ondas para fotônica de silício com uma curva na forma de canto foi concebida no trabalho [82], focando-se na propagação em multimodo. Para que o fenômeno de reflexão interna total na direção de propagação da luz fosse conservado, foi realizada uma suavização no canto em virtude de um corte realizado segundo um ângulo transversal e com uma baixa interferência intermodal, assim os modos propagantes são modificados, resultando na redução das perdas nas bandas de comunicação óptica de 1260 nm a 1680 nm. A estrutura proposta possui uma diversidade de vantagens, tais como a simplicidade de desenho e fabricação, uma vez que não são necessárias etapas de fabricação adicionais e nem a inserção de uma nanoestrutura e não possui sensibilidade em relação aos ângulos da parede lateral, além de ajustar a largura do núcleo, conforme as curvas de dispersão.
- (q) Em [83] o MEF 2D foi utilizado para avaliar a transmissão em um guia de ondas com curvatura de 90° composto de silício e sílica segmentados periodicamente alcançando transmissão superior a 90% e com larguras do guia variando de 160 nm a 300 nm, isso ocorrendo pela variação dos raios de curvatura entre 3 mm e 10 mm e comprimento de onda entre 1400 e 1600 nm e foi realizada uma comparação entre guia de onda reto e segmentado.

2.3 Estudos com guias de ondas com cruzamento (*Crossing*)

O cruzamento de guia de ondas trata-se de um dispositivo capaz de interligar dois guias de ondas no caminho reto com alta transmissão e baixa interferência na passagem do cruzamento. Cruzamentos de dois guias de ondas perpendiculares, ou seja, cruzamento no seu formato mais simples costumam funcionar bem na plataforma SiO_2 , mas é importante para seu funcionamento adequado a realização de uma modificação cuidadosa na seção de cruzamento. É uma estrutura importante para fazer parte do circuito integrado fotônico e com frequência pode ser utilizado para roteadores e switches ópticos [50]. Sendo assim, seguem trabalhos

realizados na literatura sobre guias de ondas com cruzamento por meio de itens.

- (a) A otimização da geometria em cruzamentos de guias de onda com a finalidade de aumentar o desempenho de dispositivos foi utilizada no trabalho [60]. Tal estudo proporciona a redução da complexidade da fabricação de circuitos densos e compostos por um grande número de cruzamentos. Para assegurar a transmissão de modo único para a polarização TE, foi utilizada a largura do guia de ondas de 500 nm. A otimização foi realizada por meio do Algoritmo Genético em conjunto com um expensor de modo otimizado, fixado o comprimento de onda em 1550 nm. Ao longo das portas a largura foi igualmente espaçada em vários pontos, para obter o máximo de transmissão e reflexão e interferência menores. A área ocupada pela estrutura é de $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ em SOI, com perdas menores que 0,2 dB, sendo que a interferência e reflexão encontradas foram inferiores a 40 dB considerando uma ampla largura de banda de 20 nm.
- (b) A possibilidade de remover as restrições nas interseções de guias de ondas ópticos e a construção de sistemas fotônicos de silício de alta complexidade e densidade com desempenho uniforme, sobretudo em cruzamentos, que são blocos de construção básica, em fotônica do silício, é reforçada no trabalho [84], através da otimização de cruzamentos de guias de ondas com larguras de $0,5 \mu\text{m}$ e $0,42 \mu\text{m}$, com operação em 1310 nm e 1550 nm, respectivamente. Os métodos PSO e FDTD foram utilizados para o processo de otimização. O PSO foi utilizado, especialmente, por ser capaz de projetar dispositivos com uma multiplicidade de parâmetros. Para a otimização foram variadas 13 larguras nos ramos e avaliadas as suas contribuições para a geometria final. As perdas de inserção foram de $0,028 \pm 0,009$ dB em 1550 nm e $-0,017 \pm 0,005$ dB em 1310 nm. Já as perdas de interferência foram inferiores a -37 dB. Com os parâmetros resultantes da simulação é possível usá-los em trabalhos futuros, através de uma análise de sensibilidade e encontrar outras larguras com desempenhos maiores.
- (c) Na sequência, a construção de chips através de procedimentos usados para a microeletrônica atual fundamentados no processo CMOS, é um ganho proporcionado pela fotônica do silício [85]. A eficácia em conduzir e operar diversos elementos de informação simultaneamente com luz, em comprimentos de onda diferentes, modos ou polarizações é um dos maiores ganhos da fotônica em relação à eletrônica [86–89]. Para fortalecer tal ideal, geometrias compatíveis com o CMOS foram propostas, através de arranjos de cruzamentos de guias de ondas [90]. Para resultados de perdas ultrabaixas de cruzamento de 0,04 dB a periodicidade do arranjo de cruzamento foi combinada com a diferença nas constantes de propagação dos modos e a excitação proporcional de uma onda de Bloch de baixa perda, o que resultou em uma divisão constante de propagação.
- (d) Posteriormente, as condições de processamento e os parâmetros de *design* foram diferenciais para reduzir as perdas e a área ocupada pela estrutura no trabalho [59], onde foi demonstrada a viabilidade dos

cruzamentos de guias de ondas com base nos guias de ondas plasmônicas híbridas à base de silício, baseados em interferência multimodo, em 1550 nm e a simulação dos cruzamentos foi realizada com a utilização do FDTD-3D. As perdas de inserção e interferência em 1550 nm são respectivamente, $4,9 \pm 0,3$ dB e -22 dB, com eficiências de transmissão acima de 60%. Embora tal estrutura é apresentada como solução potencial, o efeito da dispersão nos pontos da travessia existe e não é trivial a eliminação completa, uma vez que existe nessas estruturas, uma conexão física dos guias de ondas de cruzamento [91]. Dessa forma é importante enfatizar a necessidade do desenvolvimento de cruzamentos e métodos associados, capazes de quebrar essas barreiras.

- (e) A escolha adequada da largura e comprimento da seção da interferência multimodo, junto com a possibilidade de fazer com que as auto-imagens do modo TM₀ e TM₁ estivessem no centro do cruzamento, foram investigadas no trabalho [92], através da realização de um cruzamento de guia de ondas, com base em SOI, de modo duplo, para aplicação de interconexão multimodo no circuito integrado. Para ambos os modos TM₀ e TM₁, os resultados apresentaram perda de inserção inferior a $\sim 1,5$ dB e interferência inferior a ~ -18 dB, em uma largura de banda superior a 80 nm. Dois cruzamentos de 90° e quatro fitas compõem o dispositivo proposto no artigo. Para circuitos, que fazem uso da multiplexação de modo, o estudo em questão, pode aumentar a densidade de integração dos mesmos.
- (f) O aumento do números de pontos em cruzamentos para geração da geometria é realidade em sistemas de circuitos fotônicos com alta densidade de integração e para atender a necessidade existente, para conceder mais flexibilidade e atender sistemas complexos, o trabalho [4] fez uso do projeto inverso para projetar cruzamentos 4x4, 5x5 e 6x6, baseados em cristais fotônicos, com o potencial da fotônica do silício, através do uso do algoritmo de otimização de busca direta não linear, com a finalidade de encontrar uma combinação de orifícios ótima e para calcular as distribuições ópticas o FDTD 3D foi utilizado. A ideia é descobrir como inserir pixels circulares na região de acoplamento, a cada variação dos estados dos pixels, uma nova função de avaliação é gerada e se essa função não apresentar melhorias, a otimização é finalizada. Os dispositivos são projetados, de acordo com essa descoberta. Após o processo de otimização as perdas de inserção media obtidas estão abaixo de 0,75, 0,9 dB e 1,5 dB, já os *crosstalks* estão abaixo de -22,5 dB, -20 dB e -18 dB, ao considerar o comprimento de onda de 1550 nm e com largura de banda de 60 nm.
- (g) A área necessária para implementar o cruzamento no circuito fotônico e o ângulo mínimo foram discutidos no artigo [39] através da proposta de cruzamentos de estrela 3x3, 4x4, 5x5 e 6x6, com perdas de inserção abaixo de 0,067 dB, 0,075 dB, 0,081 dB e 0,133 dB, respectivamente e alta tolerância de fabricação. As geometrias são compatíveis com o processo CMOS de 180 nm e possuem também a finalidade de melhorar a densidade de integração do circuito integrado fotônico, através da otimização da porta de entrada. Observou-se que, os cruzamentos, que apresentaram o melhor desempenho, fo-

ram os de área maior e além disso, o ângulo mínimo pode ter até 18° , em um cruzamento de estrela, com largura $6\ \mu\text{m}$ de interferência multimodo, para uma interferência comparável de $-30\ \text{dB}$. O método FDTD-2D foi utilizado, para simular o dispositivo e o FDTD-3D foi empregado, para analisar os resultados obtidos pela otimização, além disso, as larguras e comprimento dos guias de ondas foram otimizados, através do uso do PSO. Após realização das simulações, foi possível obter eficiência média de transmissão superior a $99,4\%$ de $1500\ \text{nm}$ a $1600\ \text{nm}$.

- (h) Considerando as que ondas que se propagam nos guias podem ter polarizações diferentes, a construção de cruzamentos de guias de ondas insensíveis à polarização são altamente desejados e foram desenvolvidos no artigo, usando o método de design inverso [64], em uma plataforma de silício sobre isolador. Foram obtidos resultados de simulação, em termos de perda de inserção inferiores a $0,18\ (0,25)\ \text{dB}$, no intervalo de $1440\text{-}1640\ \text{nm}$, admitindo-se o modo $\text{TE}_0\ (\text{TM}_0)$ e tão pequena quanto $0,08\ (0,07)\ \text{dB}$, ao levar em conta $1550\ \text{nm}$. A criação de sistemas fotônicos com controle de polarização pode ser beneficiada por esse estudo.
- (i) Para o desenvolvimento de sistemas de multiplexação por divisão de modo (MDM) em um circuito integrado, o trabalho [93] apresentou uma solução, utilizando cruzamento de guia de onda multimodo, na Plataforma SOI, e para reduzir o desequilíbrio para os dois modos polarizados elétricos transversais (TE), uma combinação entre guias de ondas na região do acoplador de interferência multimodo. Em termos de simulação, os resultados apresentados pelas perdas de inserção foram de $0,043\ \text{dB}$ para o modo TE_0 e $0,084\ \text{dB}$ para o modo TE_1 , em $1550\ \text{nm}$, sendo a interferência abaixo de $-30\ \text{dB}$, para ambos os modos. O trabalho traz a possibilidade de redução das incompatibilidades nas interseções das estruturas.
- (j) Posteriormente, a importância do uso do método do projeto inverso, na otimização de cruzamento de guias de ondas, foi mais uma vez reforçada no trabalho [94], o processo do método aplicado foi dividido em duas etapas, sendo a primeira constituída pela determinação dos parâmetros que compõem a estrutura e o desempenho alvo, em seguida, considerando os critérios de desempenho definidos previamente, algoritmos de otimização são usados para projeto e otimização do dispositivo. Para simulação e cálculo da estrutura, foi utilizado o algoritmo de busca binária direta. Foi realizada uma discretização do dispositivo em pixels quadrados e tais pixels vão sendo alterados ou mantidos, de acordo com a função de avaliação obtida no processo de otimização. Além do cruzamento de guia de ondas, o projeto também conta com um demultiplexador de comprimento de onda, na plataforma SOI, permitindo a melhora na transmissão de sinais ópticos e perdas de inserção de $-0,93\ \text{dB}$ e interferência de $-18,4\ \text{dB}$, na porta de entrada, apresentando um desempenho muito bom.

3. DETALHAMENTO DAS ESTRUTURAS UTILIZADAS

Após um levantamento realizado no Capítulo 2 sobre as produções acadêmicas direcionadas às geometrias iniciais selecionadas para os projetos deste trabalho para otimização dos parâmetros geométricos, foi possível observar usos frequentes de modificações das geometrias nos cantos da curvatura ou na intersecção de guias de ondas ópticos, do índice de alto contraste na plataforma SOI, para facilitação do confinamento óptico e a utilização de dimensões submicrônicas. Além de um cuidado na escolha de técnicas adequadas à aplicação em questão, buscando o uso de métodos numéricos para tornar válidos os métodos de otimização utilizados. Após a leitura dos trabalhos realizados, foram determinadas as estruturas base para o processo de otimização.

3.1 *Estrutura inicial do guia de ondas com curvatura 90°*

A primeira estrutura proposta como dispositivo para redução de perdas devido à curva de 90° é apresentada na Figura 3.1 com a geometria da estrutura a ser otimizada como base para o guia com curvatura de 90° tendo uma cavidade ressonante com corte de 45° e duas portas perpendiculares. A estrutura foi inspirada no trabalho [15], o qual obteve um valor de 98,6% de eficiência de transmissão, e foi otimizada com o propósito de reduzir perdas por meio da suavização dos cantos, sendo uma contribuição que inova ao modelo da estrutura. O guia de ondas curvo é um dispositivo de transmissão de potência de 2 portas. A configuração foi otimizada por meio da mudança na posição dos pontos, já havia o corte no trabalho [15], o papel do agente otimizador foi aumentar a eficiência de transmissão. Na configuração da curvatura, o modo do guia de onda sofre reflexão interna total no corte de 45° e é guiado em torno da esquina alterada pelas paredes exteriores. A profundidade do corte tem efeitos na largura de banda da resposta. Foi observado em simulações numéricas, que existe uma relação direta entre a profundidade do corte e o aumento da transmissão e da largura de banda.

A largura dos guias de ondas utilizados foi de $0,2\ \mu\text{m}$ e para não alterar sua largura, algumas coordenadas permaneceram constantes. A malha da estrutura de chute inicial possui 16.717 nós e 8.264 triângulos e uma área do dispositivo de $0,72 \times 0,72\ \mu\text{m}^2$ para modelagem com o MEF. Foram realizadas análises dos guias curvos com ressonador e tentativas de mudanças no tamanho do ressonador e no corte externo modificando parâmetros geométricos. Guias de onda com curvatura de 90° e um corte de 45°, com camadas de PML (camadas perfeitamente casadas) em seus limites foram projetados. Tais guias foram utilizados para simulações e foram calculadas suas eficiências de transmissão de potência. Foi utilizado apenas 1 canto, pois ao modificar uma estrutura de uma cavidade, esse canto ajuda a mudar a direção de propagação da onda. Além disso, os índices de refração utilizados para simulações foram $n_1 = 3.476$ (silício) e $n_2 = 1,444$ (sílica).

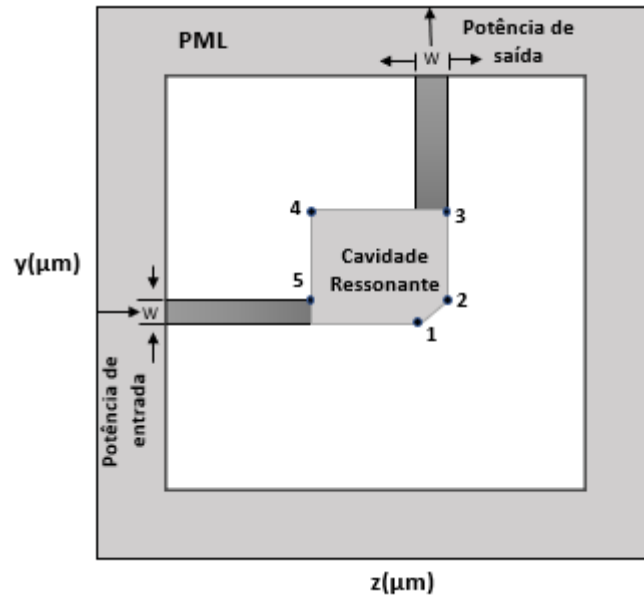


Fig. 3.1: Esquemático do guia com curvatura de 90° com a cavidade ressonante, baseada no trabalho [15].

A estrutura base foi otimizada através de mudanças realizadas em 5 pontos na cavidade da curva de 90° por meio do AM e o híbrido GRASP-RS. As alterações, nas coordenadas dos pontos, ocorreram aleatoriamente dentro de uma faixa de valores e os intervalos das coordenadas usadas para os pontos da geometria inicial foram os representados na Tabela 3.1.

Tab. 3.1: Intervalos escolhidos para a curvatura

Coordenada(μm)	Intervalo
x_1	$[-0,32;0,10]$
y_1	fixo = -0,1
x_2	fixo=0,1
y_2	$[-0,09;0,32]$
x_3	fixo = -0,1
y_3	$[0,62;2,50]$
x_4	$[-1,64;-0,21]$
y_4	$[0,25;1,56]$
x_5	$[-2,47;-0,62]$
y_5	fixo = -0,1

3.2 Estruturas iniciais dos guias de ondas com cruzamento 2×2

O potencial da fotônica de silício pode ser concretizado por meio do projeto de cruzamentos de guias de ondas [95]. Dessa forma, a proposta de investigar tais estruturas é proveniente da possibilidade de apresentar os efeitos decorrentes da mudança de parâmetros geométricos para a otimização da transferência de potência. Nesta seção outras estruturas investigadas são apresentadas como duas estruturas iniciais que passaram por um processo de otimização, ambos guias de ondas com cruzamentos 2×2 e as metaheurísticas PSO, LC e o híbrido GRASP-RS foram adotadas para encontrar os parâmetros geométricos que maximizassem a potência de saída. A Figura 3.2(a) representa o primeiro guia de ondas com cruzamento 2×2 com a largura do guia de ondas em $w = 0,4 \mu\text{m}$, com uma malha de 30.734 nós e 30.734 triângulos para uma área do dispositivo de $1,24 \times 1,24 \mu\text{m}^2$. Os índices de refração utilizados para simulações foram $n_1 = 3,476$ (silício) e $n_2 = 1,444$ (sílica). O guia de ondas com curvatura é um dispositivo de transmissão de potência de 4 portas. As duas estruturas analisadas como base para otimização dos cruzamentos foram baseadas no trabalho [50].

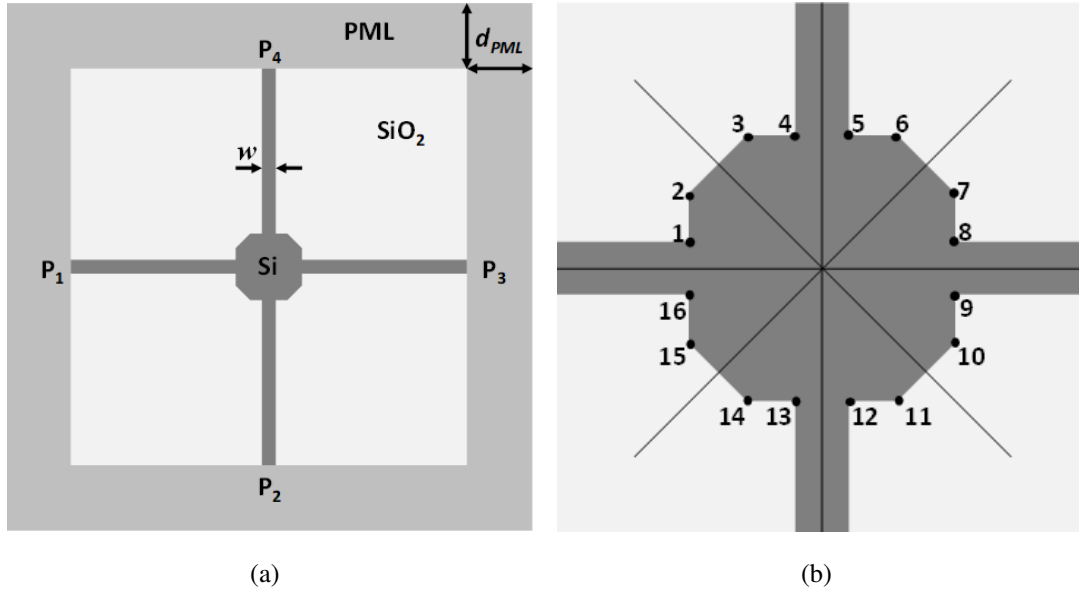


Fig. 3.2: (a) Estrutura de cruzamento anterior ao processo de otimização, baseada no trabalho [50]. e (b) pontos a serem otimizados, com a restrição de simetria de 90° .

Foram realizadas otimizações no centro do cruzamento da estrutura modificando parâmetros geométricos associados, sendo que a largura dos guias de ondas não foi otimizada, permaneceu constante durante todo o processo e o comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. A metaheurística PSO adaptada foi usada para descobrir os valores das coordenadas associadas aos pontos, que maximizam a função objetivo, dada pela que maximizem a transferência de potência dada pela razão $\text{Eff} = P_3 / P_1$ e minimizam as razões P_4 / P_1 e P_2 / P_1 . O objetivo principal do problema é encontrar o conjunto de coordenadas que forneça a maior eficiência de transmissão do guia de ondas de cruzamento. Pode-se observar na Figura 3.2(b) que é necessário definir apenas as coordenadas do ponto 1 e do ponto 2, uma vez que as coordenadas dos outros 14 pontos podem ser determinadas facilmente, considerando as simetrias de dobra impostas à estrutura, pois ela deve apresen-

tar uma simetria de rotação de 90° . O conjunto de coordenadas proposto pode originar uma variedade de configurações de dispositivos. Os intervalos para as coordenadas foram escolhidos de acordo com a Tabela 3.2, para inicializar o processo de otimização.

Tab. 3.2: Intervalos escolhidos para o cruzamento de 2 pontos.

Coordenada(μm)	Intervalo
x_1	$[-3,82; -0,48]$
y_1	fixo = 0,20
x_2	$[-0,44; -0,19]$
y_2	$[0,08; 0,18]$

Uma segunda estrutura de cruzamento foi proposta na Figura 3.3(a), onde há o modelo da geometria do guia de ondas com mais pontos na região do cruzamento, buscando aumentar a flexibilidade da região de cruzamento, cuja largura do guia de ondas utilizado é de $w = 0,4 \mu\text{m}$ com uma malha que possui 72.025 nós, 35.840 triângulos, uma área do dispositivo com $3.64 \times 3.64 \mu\text{m}^2$ e os índices de refração para materiais de silício e sílica $n_1 = 3,476$ e $n_2 = 1,444$, respectivamente.

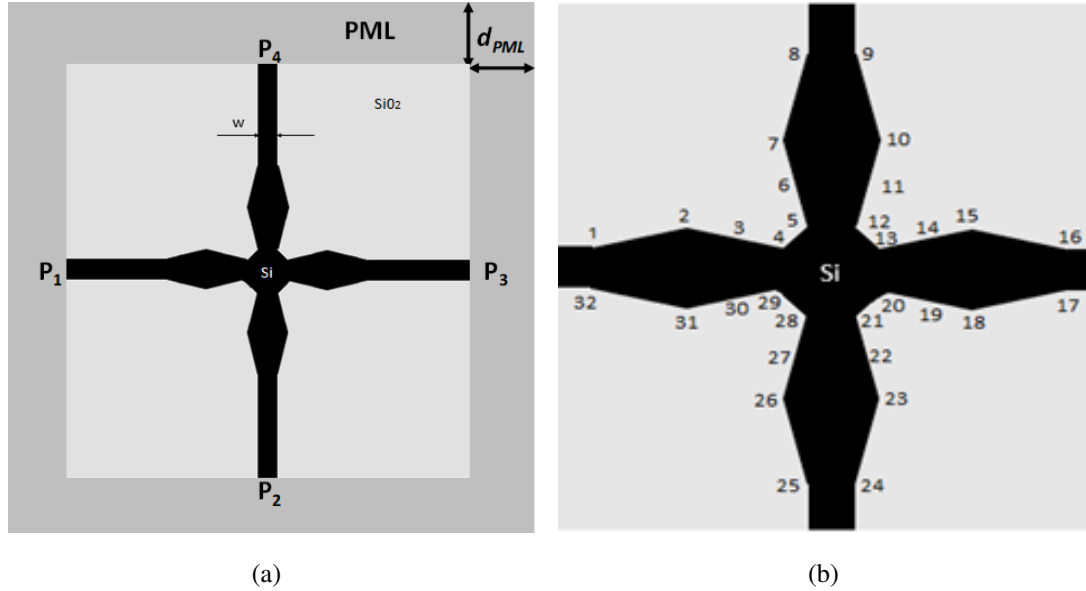


Fig. 3.3: (a) Modelo de estrutura de cruzamento usado como chute inicial para otimização, baseada no trabalho [50] e (b) Pontos alterados no processo de otimização.

Neste trabalho o algoritmo de otimização foi usado para projetar e otimizar os parâmetros geométricos de silício compacto de banda larga na estrutura de cruzamento de guia de onda de isolador, operando na faixa de comprimento de onda de 1400-1600 nm.

Foram realizadas modificações na seção transversal dos guias de ondas no cruzamento como forma de aumentar a eficiência dos guias. As mudanças ocorreram pela variação dos parâmetros geométricos do cruzamento e a largura do guia de ondas foi mantida constante. O objetivo do trabalho é encontrar o conjunto de pontos da geometria projetada, que forneça o maior valor de eficiência de transmissão do cruzamento do guia de ondas proposto. Foi necessário determinar 4 pontos como mostra a Figura 3.3(b), pois os 28 pontos restantes podem ser obtidos através da simetria da estrutura, uma vez que ela deve apresentar uma simetria de rotação de 90°. A partir da geometria inicial foi possível obter uma variedade de outras geometrias alterando os parâmetros geométricos. Para realizar o processo de otimização, os intervalos de coordenadas foram escolhidos de acordo com a Tabela 3.3.

Nas faixas previamente estabelecidas, os algoritmos de otimização foram utilizados para encontrar a melhor solução ou o melhor conjunto de pontos, que maximizem a transferência de potência dada pela razão: $\text{Eff} = P_3 / P_1$ e minimizem as razões P_4 / P_1 e P_2 / P_1 . Para geração inicial dos pontos é fundamental observar que $x < y$ no primeiro quadrante, para que não haja problemas na construção da estrutura. Tanto para o guia

Tab. 3.3: Intervalos escolhidos para o cruzamento de 4 pontos.

Coordenada(μm)	Intervalo
x_1	[-4; -1,7]
y_1	fixo = 0,20
x_2	[-1,65;-1,28]
y_2	[0,14;0,17]
x_3	[-0,80; -0,70]
y_3	[0,10;0,50]
x_4	[-0,30;-0,10]
y_4	[0,03;0,15]
x_5	[-0,15;-0,03]
y_5	[0,1; 0,30]

de ondas curvo como para o guia de ondas com cruzamento, a otimização foi feita para apenas um comprimento de onda, o $1,55 \mu\text{m}$. Após a otimização, a melhor estrutura foi testada para outros comprimentos de onda. As malhas tiveram que ser refeitas a cada nova solução, porque tratam-se de configurações diferentes. O sistema matricial dos elementos finitos tem que ser resolvido com uma nova malha.

4. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO, MATERIAIS E MÉTODOS

O termo metaheurística foi derivado da palavra heurística, o sufixo meta tem o significado de "além". Antes do termo metaheurística aparecer, as metaheurísticas eram chamadas de heurísticas modernas [96,97].

Métodos de otimização de geometrias mostraram atuar com uma resposta promissora, para solução de problemas em projetos de sistemas fotônicos [6,82,93,95]. O processo de otimização é uma ferramenta, que pode contribuir para o desenho de diversos componentes ópticos, na fase anterior ao envio de projetos para a etapa do processo de fabricação. A fase de desenvolvimento do projeto, através de técnicas, capazes de realizar o ajuste de parâmetros na estrutura do dispositivo faz diferença no desempenho final [33].

Embora possa existir uma variação nos tempos de simulação de projetos de dispositivos eletromagnéticos, a inserção da otimização pode trazer benefícios para os resultados de projetos, fornecendo aos projetistas um poder de modelagem e fabricação de dispositivos com melhor desempenho. Uma vez que, a busca por soluções aceitáveis nem sempre é intuitiva e muitas soluções não são tão simples de encontrar, as técnicas metaheurísticas foram popularizadas [98] e há muitos casos de sucesso aplicados com essas estratégias, tais como o algoritmo genético [99], AM [41], PSO [42], LC [100], GRASP [101], RS [102]. Para reforçar esses resultados positivos, um estudo destacou a eficiência de metaheurísticas inspiradas na natureza, para solucionar problemas de otimização global, em que a avaliação da função objetivo é custosa [28].

Devido ao tamanho da complexidade de muitas demandas industriais, torna-se inviável tratá-las por meio de algoritmos exatos como, por exemplo, o algoritmo *branch-and-bound* [103, 104]. Não são conhecidos algoritmos de tempo polinomial exatos, para resolver problemas computacionalmente intratáveis. Há no mundo real problemas classificados como NP-difícil, os quais são compostos por muitas variáveis e sendo assim, se há um aumento na dimensão desses, há um crescimento exponencial no espaço de busca por soluções viáveis, o que torna os métodos exatos inviáveis, uma vez que, não há sucesso na resolução desses problemas com tempo computacional aceitável [105].

A origem do termo heurística é proveniente do grego, que significa descobrir [106]. Por meio do uso de heurísticas são coletadas informações do problema para reduzir o caminho no processo de busca por soluções. Uma vez que são conhecidos dados do problema a ser aplicado, um pensamento heurístico pode auxiliar na seleção dos melhores caminhos para alcançar uma solução ótima.

Até o momento não há um consenso sobre a definição do termo metaheurística [96]. Entre as definições propostas de metaheurística tem-se como um processo capaz de guiar uma heurística vinculada através da união de conceitos de investigação e estratégias de aprendizagem, para explorar o espaço de busca e descobrir soluções próximas da ótima [107].

Heurísticas são orientadas por estratégias de alto nível denominadas metaheurísticas através de uma busca "inteligente" com a geração de novas soluções e movimentos para evitar soluções indesejadas e na tentativa da produção de soluções de alta qualidade, as decisões ocorrem com base em probabilidades [129]. Em algoritmos metaheurísticos a busca aleatória não é realizada de forma cega e sim de forma inteligente [96, 108].

Dessa forma o uso de heurísticas é adotado para buscar soluções, mas isso não quer dizer que devam ser ótimas, sendo consideradas aceitáveis. Uma solução ótima é uma solução que gera o máximo (se problema for de maximização) ou mínimo (se problema for de minimização) custo possível. É importante enfatizar que podem haver mais de uma solução ótima para o mesmo problema [102]. Iniciar com uma solução de qualidade é um fator, que pode gerar melhores resultados.

O sucesso dos métodos heurísticos está relacionado à sua capacidade de adaptação à exploração da estrutura do problema, o escape de ótimos locais, a organização dos componentes presentes no sistema, o controle da randomização e a possibilidade de reiniciar procedimentos [109]. Além disso, as heurísticas são favorecidas pela estratégia inicial de dividir o problema em um tamanho gerenciável, atuar na resolução dos subproblemas gerados e em decorrência disso conquistar as boas soluções através da melhoria dos processos iterativos [32].

Para efetuar o processo de melhoria iterativa, uma configuração do sistema conhecida é iniciada, seguida de um processo de rearranjo que é executado sobre a configuração inicial e se esse rearranjo melhora a função de custo, a configuração reorganizada passa a ser a nova configuração do sistema, nessa sequência as execuções continuam até que outra configuração melhor não possa ser encontrada. [32].

Todos os algoritmos evolutivos são descritos pelo campo de estudo denominado computação evolutiva. Sua ideia fundamental surgiu entre 1950 e 1960 e é alusivo ao processo de evolução natural como modelo para solução de problemas, usualmente simulados em um computador. Esses algoritmos apresentam características baseadas nos princípios de seleção natural do Darwinismo [110].

A seguinte estrutura faz parte do algoritmo evolutivo geral [110]:

- Um processo de reprodução de indivíduos ocorre por meio de herança, um problema do mundo real pode ter suas soluções codificadas ou representadas por meio de indivíduos, tais elementos podem passar por um processo de reprodução, capazes de gerar descendentes, com características herdadas

de seus pais;

- Variação genética: é possível alterar as características dos descendentes por um processo de mutação, onde são realizadas modificações na estrutura dos indivíduos, gerando novas possibilidades de soluções e, dessa forma, sendo possível explorar novas soluções candidatas no espaço de busca;
- Seleção Natural: Cada indivíduo por ser avaliado por meio de um valor de aptidão, ou seja, uma medida do quão adaptável ele é para aquele ambiente. Indivíduos com maior aptidão terão vantagens seletivas e assim sua sobrevivência será mais longa, levando a um processo de concorrência entre eles;

O modelo de um algoritmo evolutivo trata-se de uma operação iterativa e probabilística com uma população P que possui N indivíduos. Considerando $P = S_1, S_2, \dots, S_N$, em cada iteração t , onde S_i representa o indivíduo i da população P , sendo que cada indivíduo é candidato à solução do problema. A cada nova iteração, novas populações são geradas e operadores de busca *crossover* (recombinação genética) e mutação podem ser empregados para reprodução de novos indivíduos. Ao concluir as etapas de reprodução, variação genética e seleção é produzida uma nova geração de indivíduos [110].

4.1 Materiais e Métodos

Neste trabalho examinam-se configurações de estruturas de guias de onda curvos e com cruzamentos em 2D, para utilizar como estrutura inicial na entrada do processo de otimização de parâmetros geométricos, sendo que tais estruturas são compostas de silício e sílica. Para que o formato básico da estrutura seja aceito, é necessário avaliar o comportamento funcional da mesma. Não é trivial prever a estrutura que servirá de base para as próximas estruturas. Além disso, nos projetos deste trabalho, é inviável enumerar todas as combinações possíveis de soluções, pois há um crescimento exponencial da quantidade de soluções, onde um conjunto de pontos, associados aos dispositivos, no campo dos números reais, pode ser combinado a outro conjunto de pontos, a depender da quantidade de variáveis associadas ao problema. Para estabelecer a estrutura de chute inicial foi feito um refinamento da sua malha relacionada e verificou-se se ela era funcional e se tinha um comportamento desejado.

O desenvolvimento dos projetos pode ser visto no fluxograma da Figura 4.1 e se dá da seguinte forma: é realizada a escolha de uma configuração de estrutura de suposição inicial e tal estrutura é avaliada para análise de sua eficiência de transmissão, caso a eficiência de transmissão for acima de 50%, é realizada a implementação de um código em linguagem C, que desenha as estruturas, a partir da estrutura de chute inicial e automatiza o processo de desenho das configurações enviando para o gerador de malhas. Em seguida, um código em Matlab é construído com o algoritmo de otimização e dentro desse algoritmo é executado o cálculo das eficiências de transmissão usando MEF-2D e com isso também é necessário um ajuste de parâmetros e materiais para verificação de novas possibilidades de configurações, as simulações são executadas e dessa forma é realizada uma análise das configurações geradas, caso apresentem bons desempenhos, as simulações podem ser finalizadas, caso contrário inicia-se novamente o processo de ajuste de parâmetros e

materiais.

Cada nova configuração é gerada pelo processo de otimização, através da mudança de parâmetros geométricos da estrutura de chute inicial e essa alteração ocorre nas coordenadas dos pontos da cavidade ressonante (no caso do guia de ondas curvo) ou da região de intersecção (no caso do guia de ondas com cruzamento). No Matlab, são geradas essas coordenadas e elas são enviadas para um código em C, que é responsável por enviar as ações de desenho para o gerador de malhas- GID® - um software processador de estruturas. Em resumo, é realizada uma comunicação entre o Matlab, o código em C e o gerador de malhas.

Cada nova estrutura gerada é utilizada no modelo implementado no método MEF-2D para calcular os valores de potência transmitidos ao decorrer da simulação. A codificação do MEF -2D é baseada no trabalho [111]. Assim, o MEF-2D foi utilizado para o cálculo das eficiências de transmissão da porta P_1 (porta de entrada) e para realizar uma avaliação numérica das estruturas, a eficiência de transmissão de potência é calculada por meio da relação P_{out}/P_{in} , sendo P_{out} a potência de saída e P_{in} a potência de entrada. O projeto inverso é utilizado para construção das estruturas, no sentido que, as respostas são definidas previamente e em seguida, procura-se o dispositivo, que fornece máxima transferência de potência. As implementações dos algoritmos foram adaptados para atender aos projetos propostos.

Em todas as metaheurísticas implementadas neste trabalho levou-se em consideração o cuidado para evitar gerar uma busca incansável por coordenadas em um intervalo no conjunto numérico dos reais, sendo assim foram inseridas estruturas de controle para escapar, por exemplo de criar conjuntos de dados iguais ou que estivesse sempre em um mesmo espaço de busca, uma vez que usa-se a aleatoriedade para inicialização dos pontos pertencentes à estrutura.

Na Figura 4.1 é representado um fluxograma de como se dá a condução dos projetos realizados neste trabalho:

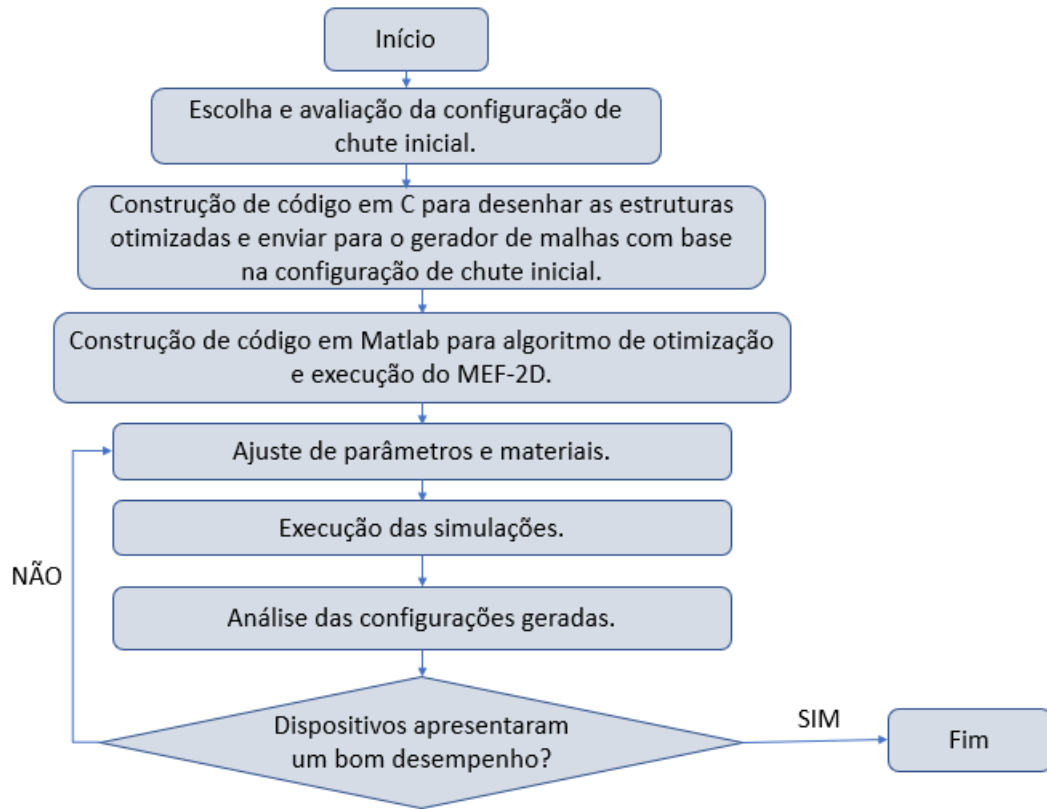


Fig. 4.1: Fluxograma do Funcionamento dos Projetos

Embora o que tenham sido otimizados sejam os pontos geométricos da cavidade ressonante do guia de ondas curvos e a intersecção do cruzamento, para realização da leitura da estrutura completa e automatização dos processos de redesenho de cada configuração otimizada foi necessário na codificação para desenhar as estruturas considerar, por exemplo: a quantidade de elementos que integram as configurações e é representada por triângulos, pontos, linhas e superfícies, que limitam o domínio computacional, todas as conexões existentes entre os elementos da estrutura são avaliadas.

O MEF trata-se de uma ferramenta capaz de analisar estruturas e pode ser aplicado a uma enormidade de problemas, além de ser bastante flexível e capaz de resolver equações diferenciais e problemas eletromagnéticos associados. Ao utilizar o método numérico FEM, a estrutura é particionada em elementos finitos e tais componentes são reconectados, para que os pedaços sejam mantidos unidos. Para realizar o processo de geração de malha, é possível usar programas, que são capazes de processar graficamente a estrutura [16, 27, 112, 113].

O MEF pode ser usado para solução precisa de problemas de engenharia. É um método que tem sido utilizado para análise de eficiência de problemas práticos. A proposta do método é conseguir transformar um problema complexo em um simples, através da discretização dos problemas. Um dos fatores que proporcionou o seu desenvolvimento foi o avanço dos computadores e linguagens de programação [114].

Para transformar o problema físico em um modelo matemático, são necessárias suposições, que geram equações diferenciais, as quais orientam o modelo. Como trata-se de um modelo numérico, é necessário a avaliação do quanto precisa é a solução. A solução numérica é repetida até que os critérios de precisão sejam atendidos e para isso os parâmetros de solução são refinados através da malha utilizada. O domínio do problema é subdividido em problemas menores, para isso é necessário fazer uma definição apropriada dos elementos que representam a aplicação. É importante localizar regiões de maior interesse do problema para inserir as restrições e quantidade de elementos adequada, em geral quanto maior for essa quantidade, melhor é a aproximação da solução para a equação diferencial [114].

A discretização no MEF envolve a construção da malha de elementos finitos, na qual existem elementos que passam por uma pré-seleção, onde cada nó pertencente à malha é numerado e com isso é possível gerar uma geometria vinculada ao problema [114]. Para realizar o desenho das estruturas no gerador de malhas, cada uma delas é particionada em triângulos e em regiões de maior interesse, com um refinamento maior, ou seja, mais triângulos. Além disso, materiais foram selecionados para as estruturas, sendo o silício e sílica. Nas Figuras 4.2 e 4.3(a) estão representadas as malhas utilizadas para otimização dos problemas de curvatura e cruzamento, respectivamente. Sendo que na Figura 4.3(b) está representada a ampliação da região do cruzamento que passou pelo processo de otimização.

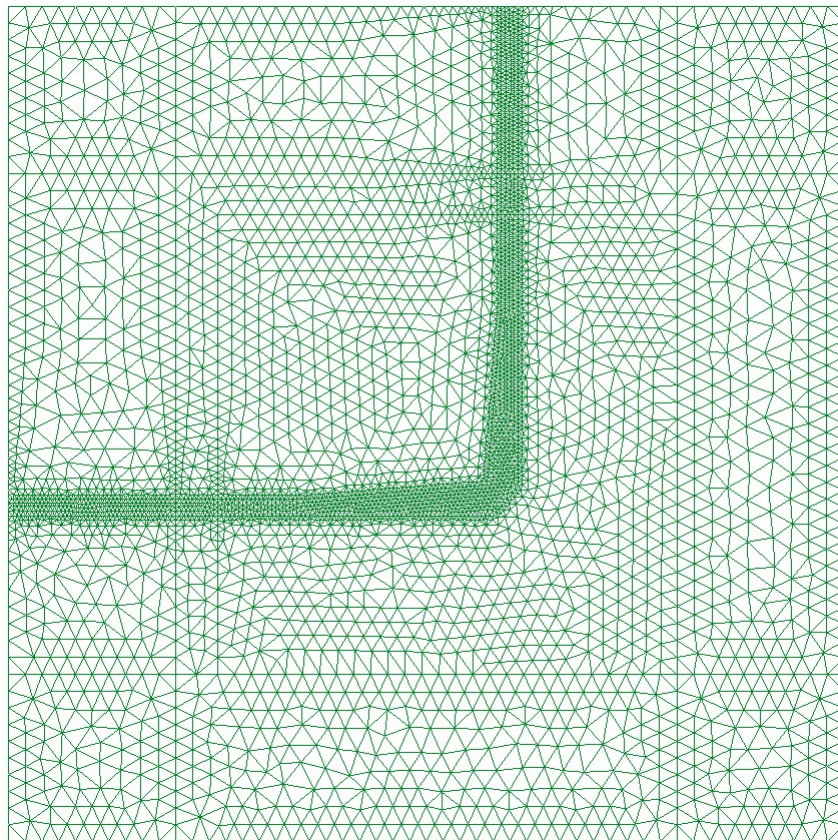


Fig. 4.2: Malha utilizada para a curvatura.

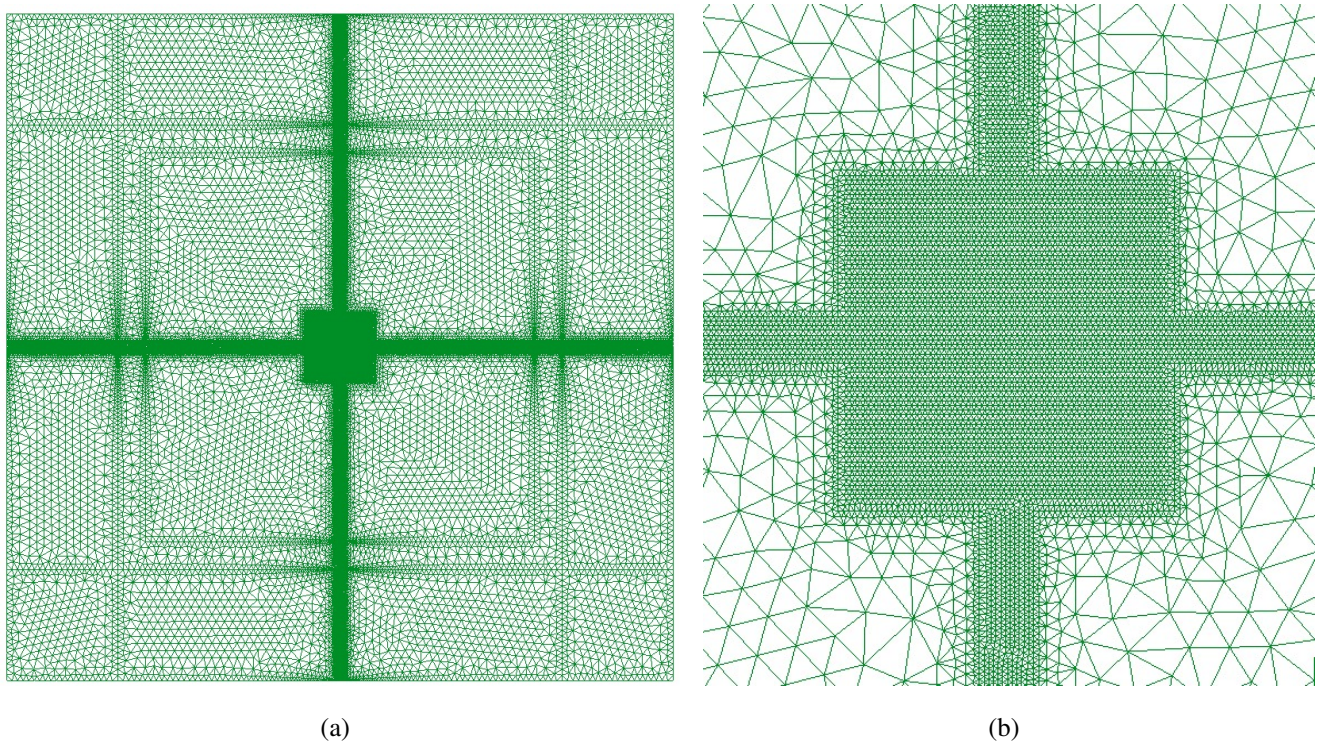


Fig. 4.3: (a) Malha utilizada para o cruzamento de 4 pontos e (b) Ampliação da malha na região do cruzamento de 4 pontos.

O laboratório de telecomunicações da Escola Politécnica da Ufba é utilizado como infraestrutura para desenvolvimento dos projetos, onde estão os recursos disponíveis, para realização dos projetos, como computadores e softwares.

Nos tópicos seguintes são apresentadas as metaheurísticas utilizadas para as estruturas com guias de onda com curvaturas e cruzamentos.

4.2 AM (Algoritmo Memético)

O AM foi citado pela primeira vez no final da década dos anos 80, quando os ideais de computação evolutiva começam a ser consolidadas e devido o conflito de conceitos com o surgimento dessas técnicas diferentes das existentes [115].

O termo memético foi proveniente do termo em inglês “meme”, criado pelo autor R.Dawkins e remete à ideia de imitação (cópia), algo a ser propagado. Está relacionado ao conceito de busca em algoritmos que possa ser reproduzido por outros indivíduos e dessa forma gerar o melhoramento de soluções de bons resultados [115].

O AM desenvolveu-se a partir do Algoritmo Genético tradicional e trata-se de uma combinação entre busca local realizada para cada indivíduo com uma estratégia global e fundamentada na população, ele usa

artifícios computacionais baseado em variáveis locais para evitar que o algoritmo se engane e convirja para uma solução indesejável. A ideia é a redução da probabilidade de convergência prematura em relação ao Algoritmo Genético através de uma técnica de pesquisa local. Ao realizar a comparação entre os algoritmos, foi possível observar que o AM apresentou desempenho melhor ao ser aplicado em problemas combinatórios NP-difícil [116].

AM pode ser considerado como uma boa heurística em relação à eficácia de investigar o espaço de soluções de forma ampla, a flexibilidade para trabalhar com problemas de otimização complexos, por utilizar todos os dados disponíveis no problema [117] e foi bem sucedida quando aplicada a problemas de otimização de estruturas [41, 118]. Existe uma preocupação com o amplo conhecimento da aplicação, ou seja, é importante explorar o domínio do problema em questão, pois quanto mais conhecimento se tem desse problema, podem ser encontradas soluções de maior qualidade. A classe de algoritmos meméticos é suportada por pesquisas locais e populacionais [119].

Os passos da Figura 4.4 foram adotados para o AM e sua sequência está representada por meio do fluxograma implementado na estrutura do guia de ondas com curvatura.

1. Criação aleatória de indivíduos: Foram criadas populações de 10, 20 e 30 indivíduos. Cada indivíduo é representado por um vetor com os seguintes elementos $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, y_5$, onde cada conjunto de coordenadas (x,y), representa um ponto na estrutura de curvatura e a proposta é realizar mudanças nesses 5 pontos dos cantos da curvatura. Os valores das coordenadas são criados de forma aleatória, mas ao mesmo tempo respeitando os intervalos mencionados no detalhamento do guia de ondas com curvatura do capítulo 3, parte 3.2;
2. Avaliação baseada na relação P_{out} / P_{in} : Etapa responsável por calcular a eficiência de transmissão associada a cada configuração / indivíduo do guia de ondas de curva. Um processamento estruturado, associado a cada indivíduo é realizado pelo método FEM-2D e resulta na potência de transferência;
3. Seleção heurística: Após realizar o cálculo da eficiência de transmissão, já existem pontos de dados, que podem gerar valores de potência maiores, portanto a seleção será feita com base nas informações do problema. Além de poder ordenar os indivíduos, que possuem a melhor eficiência de transmissão do maior para o menor, também é possível armazenar características associadas aos indivíduos com maiores valores de transmissão. Chama-se de seleção heurística, uma vez que, utiliza dados do problema para diferenciar os indivíduos, não é uma busca cega e sim uma busca inteligente, pois já são conhecidas informações do problema, que podem auxiliar a encontrar soluções de forma mais rápida;
4. Recombinação: Utiliza o conhecimento sobre os problemas para criar descendência, não combinando elementos de forma cega. A seleção das características dos pais é baseada em informações que maximizem a função objetivo, no caso as informações utilizadas são as coordenadas presentes em cada um dos pais. As coordenadas são combinadas para verificação de quais combinações geram os maiores

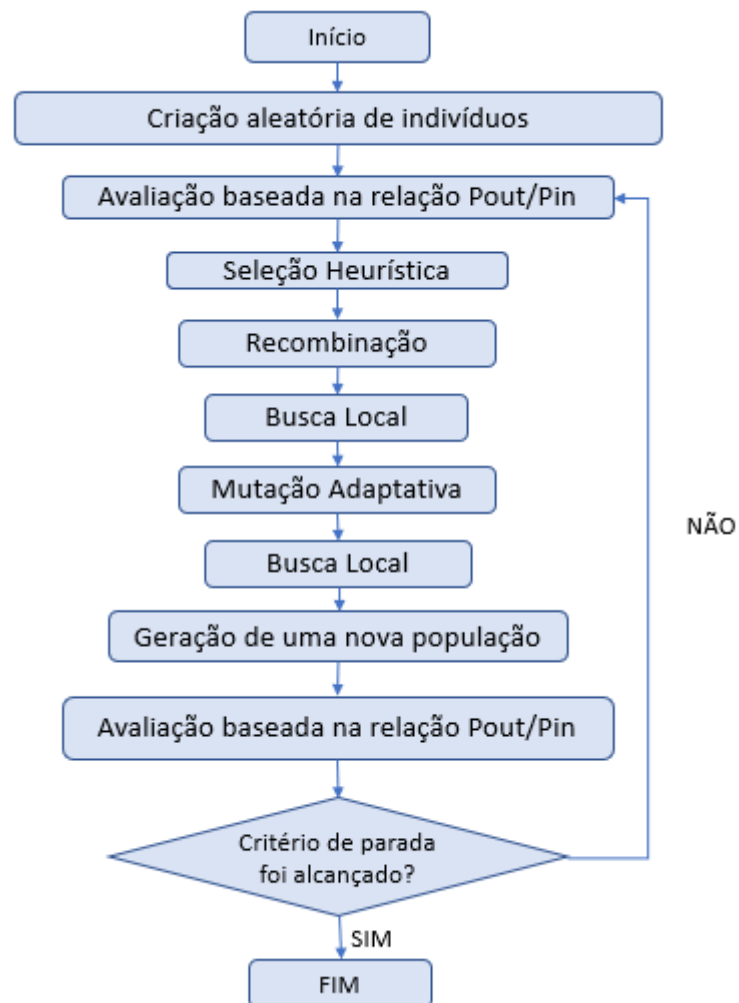


Fig. 4.4: Fluxograma do AM adaptado.

valores de função objetivo. Um conjunto de soluções formado pelas coordenadas x e y é combinado para gerar um conjunto de novas configurações para que os descendentes herdem características retiradas de seus pais. A seleção dos pais foi intencional, uma vez que são selecionados os indivíduos com os maiores valores de aptidão;

5. Busca local: as informações referentes aos valores de transmissão de potência foram utilizadas para a tomada de decisão em relação à pesquisa local. Nessa etapa são avaliados indivíduos na vizinhança de cada solução e verifica-se se os valores de função objetivo são maiores se comparados à solução analisada. No caso afirmativo é realizado um novo ordenamento e a solução com valor maior de função objetivo é inserida nas primeiras posições. Assim a busca local é realizada antes da mutação adaptativa para que seja possível buscar indivíduos com maiores potenciais de sobrevivência e evitar que a mutação cause perdas em indivíduos com alto potencial. A busca local também é realizada após a mutação adaptativa para verificar na vizinhança se existem indivíduos melhores que os encontrados após a realização da modificação de características na estrutura.

A busca local é aplicada em uma solução e tal solução pode ser substituída pela solução gerada na vizinhança. A proposta é que sejam valores muito próximos às soluções já obtidas, mas que ainda não tenham sido investigados. As vizinhanças são valores de coordenadas próximos aos valores de coordenadas gerados inicialmente e dessa forma, seriam verificados quais conjuntos de coordenadas da vizinhança gerariam soluções melhores ou próximas às melhores soluções. A busca local seria um complemento na tentativa de forçar uma convergência para um possível ótimo local. A avaliação de cada uma dessas combinações de coordenadas gera uma eficiência de transmissão para cada um dos arranjos de coordenadas. Se a eficiência do arranjo gerado das vizinhanças for maior que a da solução construída anteriormente, deve-se usar na população o arranjo da vizinhança, caso contrário deve-se manter a solução gerada previamente.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 segue um procedimento para exemplificar uma possível vizinhança de cada solução. Suponha que a solução inicial gerada esteja representada na Tabela 4.1.

Tab. 4.1: Solução gerada antes da busca local.

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,20	-0,1	0,1	0,15	-0,1	0,70	-1,20	0,50	-2,30	0,1

Uma das possíveis vizinhanças com base na solução inicial gerada está representada na Tabela 4.2.

Tab. 4.2: Solução gerada após a busca local.

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,21	-0,1	0,1	0,16	-0,1	0,72	-1,19	0,50	-2,32	0,1

6. Mutação adaptativa: nessa fase são feitas alterações nas coordenadas de cada indivíduo de forma estratégica de acordo com a adaptação deste indivíduo após a aplicação das fases anteriores. Indivíduos com altos valores de eficiência de transmissão são submetidos a pequenas modificações, enquanto indivíduos que apresentam baixos valores de transmissão são submetidos a grandes modificações. No caso analisado foi feita a condição de que se a eficiência de transmissão gerada for menor que 90%, uma quantidade de 20% de coordenadas é alterada, caso a eficiência for maior ou igual a 90% uma quantidade de 5% de coordenadas é alterada.
7. Geração de uma nova população: Após a verificação e comparação dos melhores indivíduos realizada por busca local, uma nova população é gerada. Assim, tal população, apresenta indivíduos com alto potencial de adaptação, uma vez que já foi submetida a critérios de avaliação e procedimentos de diversificação. Caso o critério de parada seja atendido, que no caso é o número de gerações, o processo de simulação é finalizado.

4.3 PSO (Otimização por enxame de partículas)

O PSO trata-se de uma metaheurística que ganhou visibilidade pela resolução de problemas, os quais não poderiam ser solucionados por meio de algoritmos determinísticos tradicionais e por ser de fácil aplicação. A técnica é inspirada no comportamento de um bando de pássaros ou cardume de peixes [120, 121], onde há uma influência no comportamento dos chefes desses bandos, sobre os outros participantes.

A forma como um bando de pássaros atuava de forma sincronizada e com mudanças de direções rápidas, dispersando e reagrupando, onde as decisões dos vizinhos influenciam nas próprias decisões [120], atraiu a atenção de pesquisadores como Reynolds [122] e Heppner and Grenander [123]. As ações sincronizadas em relação à aglomeração de espécies, a organização dos membros e as distâncias entre seus vizinhos são informações, que auxiliaram na construção dos passos do PSO. As ações são modeladas através da abstração dos dados que compõem o cenário do compartilhamento social de pássaros e peixes, dessa forma é possível usar tal modelo para otimização de parâmetros de problemas [110].

As descobertas de membros do grupo trazem ganhos para os membros individuais, o que pode ser decisivo na busca por alimento. Tal concepção tornou-se fundamental para a geração do PSO. A modelagem do algoritmo não é idêntica ao que ocorre no mundo real, sendo realizada uma abstração de tais comportamentos [120]. Como desdobramento da modelagem há uma geração de partículas, as quais passam por um processo de transformação em sua forma e ocorrem movimentações das mesmas no espaço de modelagem.

Além disso, é possível que algumas delas sejam rejeitadas e eliminadas [121].

O espaço de busca é percorrido pelo PSO a fim de encontrar soluções ótimas. Há uma influência das experiências da vizinhança em cada partícula. Supondo que $x_i(t), y_i(t)$ representam a posição no espaço de busca associada à cada partícula, em um tempo chamado de t . Cada uma das partículas é ajustada por meio de velocidades v_i , de acordo com a posição atual que ocupa, se uma próxima posição for melhor que a atual, ela passa a ocupar a posição futura, caso contrário permanece na mesma [121].

O algoritmo PSO é aplicado às partículas individualmente e em grupos, em que cada partícula tem sua posição atualizada durante o processo de iteração. As partículas são submetidas a fases de adaptação, para encontrar regiões de sucesso de exploração por meio de velocidade e posição associadas a cada partícula. As velocidades são ajustadas de acordo com a movimentação dos agentes no espaço de busca e da avaliação de suas posições associadas [120]. A velocidade pode ser ajustada com base na influência que a partícula tem individualmente e em relação às suas partículas vizinhas [124]. A melhor solução alcançada por cada partícula em um tempo t é chamada de P_{best} e a melhor solução alcançada pelo grupo de partículas é chamada de G_{best} [124]. Uma mudança no estado da população gera uma mudança em G_{best} [120].

Para o problema do guia de ondas com cruzamento as características do problema foram adaptadas ao algoritmo, onde cada solução consiste em um conjunto de 2 pontos e o objetivo é descobrir o conjunto de coordenadas associadas a esses pontos. Durante a execução do código, a velocidade e a posição das partículas são atualizadas e foram escolhidas as constantes c , que podem ser $c = 1$ ou $c = 1,1$ para auxiliar na atualização das variáveis, a escolha dos valores foi com base no trabalho [125]. A posição das partículas é alterada de acordo com o cálculo das velocidades que está associado à análise da distância entre a partícula e o melhor indivíduo atual e global.

A atualização das posições é realizada da seguinte forma:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_{ix}(t+1) \quad (4.1)$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + v_{iy}(t+1) \quad (4.2)$$

Onde $x_i(t+1)$ e $y_i(t+1)$ são as coordenadas futuras, após atualização das coordenadas $x_i(t)$ e $y_i(t)$, tais coordenadas representam a posição de cada partícula no tempo t e $v_{ix}(t+1)$ e $v_{iy}(t+1)$ são as velocidades associadas às coordenadas $x_i(t)$ e $y_i(t)$.

As velocidades são calculadas da seguinte forma:

$$v_{ix}(t+1) = c \cdot [(x_{pbest} - x_i(t)) + (x_{Gbest} - x_i(t))] \quad (4.3)$$

$$v_{iy}(t+1) = c \cdot [(y_{pbest} - y_i(t)) + (y_{Gbest} - y_i(t))] \quad (4.4)$$

Onde x_{pbest} e y_{pbest} são as coordenadas associadas ao melhor indivíduo da iteração atual t e x_{Gbest} e y_{Gbest} são as coordenadas associadas ao melhor indivíduo da iteração global. O deslocamento das partículas irá depender do resultado de v_{ix} e v_{iy} . Observe que quanto maior for o valor da velocidade calculada, mais distantes estarão as partículas do ótimo atual e do ótimo global. A atualização das posições irá depender das velocidades calculadas. As posições futuras $x_i(t+1)$ e $y_i(t+1)$ são atualizadas, de acordo com o cálculo das velocidades $v_{ix}(t+1)$ e $v_{iy}(t+1)$.

As seguintes etapas foram aplicadas ao algoritmo de otimização do agrupamento de partículas adaptado e está apresentada por meio de fluxograma na Figura 4.5.

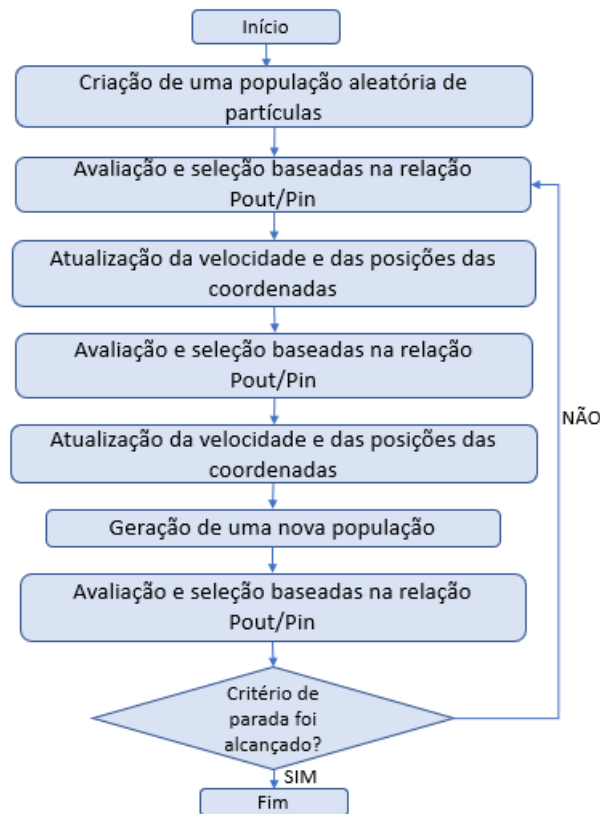


Fig. 4.5: Fluxograma do PSO adaptado.

1. Criação de uma população aleatória de partículas: Uma quantidade de 10 partículas foi inicializada aleatoriamente e cada partícula representa uma solução possível do problema. O espaço de solução é

pesquisado por meio de uma população de partículas. Cada solução consiste em um conjunto de 2 pontos, ou seja as coordenadas da estrutura de cruzamento na interseção. As partículas estão espalhadas aleatoriamente, em uma posição, dentro do espaço possível da estrutura;

2. Avaliação e seleção baseadas na relação (P_{out}/P_{in}): O cálculo da função objetivo é executado pela função de aptidão que é baseada na relação entre a potência de saída e a potência de entrada (P_{out}/P_{in}). O MEF 2D foi utilizado para auxiliar no cálculo da função objetivo. Sendo que a cada configuração de combinação de soluções viáveis, uma função objetivo é calculada;
3. Atualização da velocidade e das posições das coordenadas: O vetor de velocidade e as posições das coordenadas são atualizados, com base nas distâncias entre as coordenadas da partícula analisada e as coordenadas do melhor indivíduo da iteração atual e da análise global;
4. Geração de uma nova população: Cada partícula interage com o conjunto de partículas geradas e após as iterações busca-se a melhor posição global e individual. Assim descobre-se qual conjunto de coordenadas está fornecendo o valor de eficiência mais alto, recalculando a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. Para realizar o processo de otimização 2 pontos da estrutura de base foram variados aleatoriamente dentro de um intervalo previamente definido. É importante notar que $x < y$ é uma condição para que não haja cruzamento de linhas ao construir estruturas. Além disso, existe outra restrição que deve ser observada quando a largura do guia não pode ser alterada, portanto, algumas coordenadas não podem ser alteradas, elas devem ser constantes. O problema tem muitas restrições que devem ser respeitadas, caso contrário as estruturas não poderão ser fabricadas.

4.4 LC (Lobo Cinzento)

O algoritmo inspirado no LC foi aplicado para encontrar o conjunto de pontos que fornece a máxima transferência de potência. É importante ressaltar que não há um conhecimento prévio do conjunto de pontos que fornece o valor máximo de transferência de transmissão. Algoritmos evolucionários de computação podem ajudar nessa busca global eficiente e o algoritmo LC em comparação com outras técnicas de computação evolutiva é menos caro computacionalmente [126].

O algoritmo de otimização por LC, desenvolvido por Mirjalili et al. [127] faz parte do grupo de métodos de inteligência de enxame e é inspirado na relação de hierarquia na organização dos lobos para caçar na natureza [128]. A inspiração do algoritmo é proveniente da observação do lobo cinzento na busca de situações mais favoráveis para caça às presas, onde diferentes funções são organizadas para o conjunto de lobos e uma hierarquia é estabelecida. Os membros são divididos em grupos para auxiliar no avanço do processo de captura da presa, sendo eles alfa, beta, delta e ômega. A melhor solução encontrada até o momento é representada pelo alfa, que é o lobo responsável pela liderança em relação à alimentação, caça e migração. Se ocorrer algum problema com o alfa o beta assume a liderança do grupo. Delta e ômega possuem poderes menores em relação à alfa e beta. Como não há certeza de obtenção do ótimo global

em problemas de otimização, a ideia aqui é que os conhecidos são os três melhores da população de lobos cinzentos considerada [129], os quais são armazenados no processo de execução do algoritmo.

Os idealizadores do algoritmo observaram que a divisão em quatro grupos resultou em um melhor desempenho em aplicações do mundo real e considerar uma quantidade maior ou menor de grupos é uma estratégia a ser investigada na resolução de problemas. Diferente do PSO, que considera apenas a melhor solução do conjunto de partículas, para salvar como referência no algoritmo do LC as três melhores soluções são salvas [129].

O desenvolvimento do algoritmo do LC inicia com a geração de uma população aleatória de lobos cinzentos, que são as soluções candidatas são representadas por lobos em seguida ocorre a formação de quatro grupos de lobos, com suas respectivas posições e os valores das distâncias de cada lobo às presas são calculadas. As soluções passam por um processo de atualização à medida que ocorre o processo de busca e análise de seus respectivos potenciais para continuidade na população [129].

O problema deste trabalho é codificado da seguinte forma: cada solução ou estrutura é representada por um lobo que está associado a um vetor com 8 coordenadas, representando 4 pontos e a população de lobos está associada a uma matriz. O objetivo é combinar os pontos de forma que seja possível maximizar a transferência de potência através da geometria gerada pelo conjunto de pontos encontrados. Para obter a geometria otimizada final, as seguintes etapas foram adotadas no algoritmo GWO, sendo indicado no fluxograma da Figura 4.6.

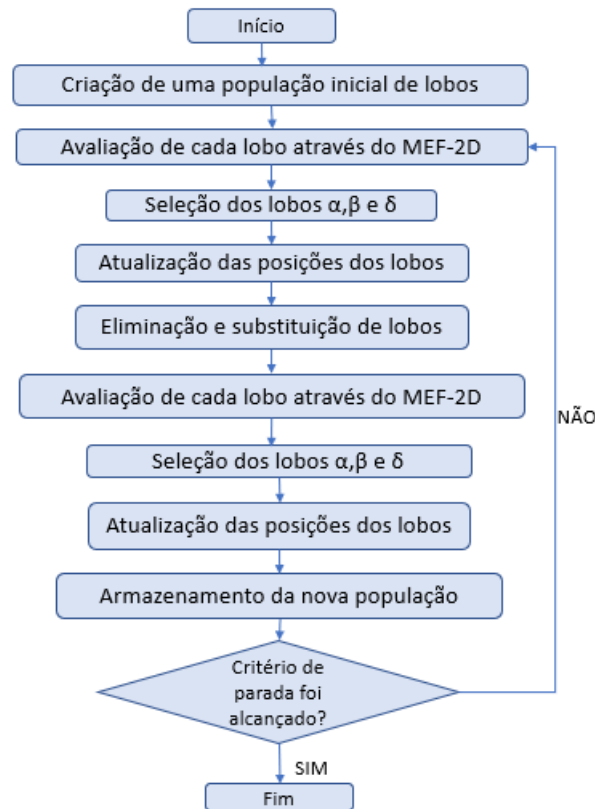


Fig. 4.6: Diagrama esquemático das etapas do algoritmo LC adaptado.

1. Geração da população inicial de lobos: Uma população inicial de 10 lobos foi gerada aleatoriamente, mas com os intervalos de restrição das coordenadas respeitados, para evitar problemas na geração da estrutura sendo necessário considerar os limites geométricos e as faixas de limitação foram apresentadas anteriormente, onde foi apresentada a estrutura trabalhada. Cada lobo ocupa uma posição no espaço de busca.
2. Avaliação de cada lobo através do MEF-2D: Cada solução (lobo) é avaliada, após a geometria ser discretizada e verificada, através de uma função objetivo (P_{out}/P_{in}), dada pela eficiência do guia de ondas de cruzamento.
3. Seleção dos lobos α , β e δ : Os lobos que estão mais próximos da presa, ou seja, que possuem os maiores valores de eficiência de transmissão são selecionados e nomeados em ordem de qualidade como lobos α , β e δ , respectivamente. A ideia é usar sempre as três melhores soluções para orientar a busca por outras soluções promissoras [107].
4. Atualização das posições dos lobos: Os três melhores lobos α , β e δ estão nas primeiras posições e para atualizar as posições dos piores lobos, ou seja, dos lobos ômega, foi utilizada a média ponderada, como no trabalho [109], ao invés da média simples para que a contribuição de cada lobo fosse mais justa e resultasse em melhor desempenho. Além disso, a cada solução encontrada é atribuído um peso. Abaixo está a média ponderada realizada para atualizar cada coordenada x e y :

$$x_{wi}(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^n E_{wi} * x_{wi}(t)}{\sum_{i=1}^n E_{wi}} \quad (4.5)$$

$$y_{wi}(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^n E_{wi} * y_{wi}(t)}{\sum_{i=1}^n E_{wi}} \quad (4.6)$$

Onde $x_{wi}(t+1)$ e $y_{wi}(t+1)$ são as coordenadas futuras associadas aos piores lobos, ou seja, onde ocorrerá o próximo movimento e $x_{wi}(t)$ e $y_{wi}(t)$ são as coordenadas atuais, E_{wi} é a eficiência de transmissão associada a cada lobo, que funciona como um peso para que a análise seja mais justa. O reposicionamento dos piores lobos será resultante do cálculo dessa média ponderada, que depende das eficiências do grupo, especificamente das eficiências dos piores lobos e de cada pior lobo analisado no momento e do grupo de piores lobos. Cada pior lobo só entra no somatório do cálculo da média ponderada, quando estiver sendo analisado.

Após a atualização das coordenadas, verificam-se quais coordenadas atualizadas estão mais próximas dos melhores lobos: α , β e δ , através do cálculo das distâncias (4.7) a (4.12).

$$D_{wi}(x_{\alpha}) = |x_{\alpha} - x_{wi}| \quad (4.7)$$

$$D_{wi}(y_{\alpha}) = |y_{\alpha} - y_{wi}| \quad (4.8)$$

$$D_{wi}(x_{\beta}) = |x_{\beta} - x_{wi}| \quad (4.9)$$

$$D_{wi}(y_{\beta}) = |y_{\beta} - y_{wi}| \quad (4.10)$$

$$D_{wi}(x_{\delta}) = |x_{\delta} - x_{wi}| \quad (4.11)$$

$$D_{wi}(y_{\delta}) = |y_{\delta} - y_{wi}| \quad (4.12)$$

Onde $D_{wi}(x_{\alpha})$ e $D_{wi}(y_{\alpha})$ são as distâncias associadas à diferença entre as coordenadas x e y do lobo α , respectivamente e cada um dos lobos ômega (piores lobos). De forma semelhante, $D_{wi}(x_{\beta})$ e $D_{wi}(y_{\beta})$ tratam-se das distâncias associadas à diferença entre as coordenadas x e y do lobo β , respectivamente e cada um dos lobos ômega. Já $D_{wi}(x_{\delta})$ e $D_{wi}(y_{\delta})$ indicam as distâncias associadas à diferença entre as coordenadas x e y do lobo δ , respectivamente e cada um dos lobos ômega.

Após a avaliação da proximidade existente entre os lobos α , β e δ e os lobos w , os lobos que estão mais próximos, são reordenados e os que possuírem as maiores eficiências são inseridos em posições iniciais da matriz de lobos.

5. Eliminação e substituição de lobos: Os lobos que possuírem eficiências menores que 85% são eliminados e substituídos por lobos modificados na mesma proporção dos que foram substituídos. A modificação ocorrida em lobos existentes é de acordo com a média ponderada calculada nas equações 4.5 e 4.6. A quantidade de indivíduos substituídos é igual aos eliminados.
6. Avaliação de cada lobo através do MEF-2D: Novamente, lobos individuais são avaliados, classificados de acordo com sua eficiência de transmissão.
7. Seleção dos lobos α , β e δ : Novos lobos α , β e δ são selecionados; novamente, eles são os lobos mais bem avaliados.
8. Atualização das posições dos lobos: Atualiza-se a posição dos novos lobos: Mesmo processo realizado no passo 4 é realizado.
9. Armazenamento da nova população: A nova população é armazenada e uma nova geração é iniciada, se o critério de parada for alcançado, finaliza-se o processo de busca.

4.5 GRASP (Procedimento de Busca Guloso, Aleatório e Adaptativo)

O Grasp trata-se de um algoritmo de busca [130] voltado a problemas de otimização combinatória [101]. O algoritmo facilita a construção de soluções através da combinação dos conceitos de busca gulosa, aleatória e adaptativa por uma trajetória que realiza buscas por soluções ótimas. Diferente de algoritmos evolutivos no GRASP não existe uma inspiração na natureza em relação à capacidade de adaptação dos indivíduos para manutenção da sobrevivência no ambiente, em contrapartida existe uma construção de soluções viáveis a cada iteração por um processo guloso, aleatório e adaptativo [103].

A característica da gulosidade está associada à seleção das melhores opções de elementos disponíveis e tal avaliação é realizada, por meio de uma função gulosa, na qual é mensurada o quão lucrativo é manter aquele elemento no conjunto de soluções [101].

Já o uso da aleatoriedade se dá por método probabilístico vinculado a um parâmetro μ , que é responsável pelo controle da quantidade de elementos de uma lista denominada lista restrita de candidatos (RCL) e que irá manter os melhores candidatos do conjunto de elementos avaliados [116]. Os candidatos geradores das melhores soluções aumentam sua probabilidade de serem escolhidos de forma semelhante ao procedimento de roleta do Algoritmo Genético. A diversidade populacional ocorre pela escolha da lista de candidatos, que pode estar associada a soluções de diferentes tipos de qualidade, possibilitando fugir de ótimos locais.

O algoritmo heurístico tem essa particularidade, em que cada elemento sofre atualizações a cada iteração, ou seja a função gulosa é atualizada [101, 103]. Ao decorrer dos passos dos algoritmos elementos são selecionados para serem inseridos no grupo de soluções e com isso existe uma adaptação do algoritmo, para o surgimento de novas soluções que venham a maximizar ou minimizar a função gulosa, tornando-se inteligente. Existe uma atualização de soluções, se uma solução melhorada for encontrada [109].

O procedimento consiste de um processo iterativo e cada iteração equivale a duas fases, uma delas é a construção da solução inicial viável, na qual é construída de forma iterativa a cada iteração é construído um elemento e os próximos elementos a serem adicionados são determinados. Por meio de uma ordenação em uma lista restrita de candidatos de acordo com a associação feita através da função gulosa adaptativa, e os elementos são selecionados a partir dessa lista [109].

A próxima fase trata-se de uma busca local em relação à vizinhança da solução gerada inicialmente pela busca por melhores soluções. Os candidatos vizinhos à solução são avaliados por meio de uma função de custo para investigar um ótimo local na vizinhança da solução, construída previamente e sendo melhor essa solução encontrada na vizinhança, ela substitui a solução atual, sendo assim guarda-se como resultado a melhor solução analisada [101, 103, 109].

Cada iteração do GRASP não usa conhecimento das outras iterações, ou seja, os resultados anteriores são desconhecidos e o algoritmo pode ser classificado como uma técnica de amostragem repetitiva [109].

A construção da RCL (lista restrita de candidatos) emprega regras de mínimo e máximo para definição dos elementos que serão selecionados para entrar na lista [103], da seguinte forma. Considerando as variáveis E_{max} e E_{min} , sendo que E_{max} representa a eficiência máxima encontrada pelo conjunto de soluções e E_{min} representa a eficiência mínima encontrada pelo conjunto de soluções dado em (4.13) e (4.14). Onde i representa cada elemento do conjunto de soluções do grupo G .

$$E_{min} = \min_{i \in G} E_i \quad (4.13)$$

$$E_{max} = \max_{i \in G} E_i \quad (4.14)$$

A lista RCL deve ser formada pelos i elementos, que pertencem ao grupo G e para controlar a quantidade de elementos que irá pertencer a lista RCL um dos mecanismos é baseado em valor [103]. Para usar esse procedimento foi usada (4.15), para determinar o valor mínimo de eficiência, que poderá conter nessa lista, sendo assim a variável k é o resultado das operações realizadas com as eficiências máxima e mínima obtidas pelo grupo de elementos pertencentes a G .

$$k = E_{min} + \mu(E_{max} - E_{min}) \quad (4.15)$$

Para isso tem-se $\mu \in [0,1]$, sendo que a escolha foi realizada de forma aleatória por meio de uma distribuição de probabilidade discreta uniforme [103], ou seja, a probabilidade de μ ser qualquer um dos valores pertencentes ao intervalo de 0 a 1 é a mesma. O parâmetro μ é responsável pelo controle de cardinalidade dos elementos da lista restrita de candidatos. No resultado final foram destacados os μ 's com os melhores valores obtidos provenientes das simulações.

Os valores encontrados de k irão determinar quantos elementos estarão presentes na lista restrita e as soluções com valores abaixo de k não deverão estar presentes na lista. As soluções que são inseridas na lista, devem estar presentes no conjunto $E(i) \in [k, E_{max}]$.

Uma vez que existe a necessidade de ajuste de poucos parâmetros, a implementação do algoritmo pode se concentrar na construção de estruturas de dados eficientes para garantir iterações mais rápidas [109]. Assim, tanto o GRASP como o RS são os únicos algoritmos usados neste trabalho, em que não há uma simulação do comportamento de seres vivos.

4.6 RS (Recozimento Simulado)

O algoritmo RS é inspirado em ideias de mecânica estatística e uma aproximação ao comportamento de sistemas físicos ao ser submetido a um banho térmico. Assim como o próprio nome indica, existe uma tentativa de simular essa mudança de temperatura [32, 102]. Conceitualmente, considerando que a alta temperatura em um sistema físico está associada a uma desordem de um grande número de átomos, sendo assim a energia do sistema também é alta. Para ordenar esse estado é necessária a redução da energia do sistema reduzindo a temperatura do sistema [131]. A ideia da variação da temperatura está vinculada à movimentação dos átomos e que de modo gradativo, à medida que a temperatura sofre uma redução, eles tendem a ficar em estados de energia menores. Usa-se o termo congelado ao fazer referência a um estado, em que não existe probabilidade de haver melhoria no custo [102]. Portanto, um sistema está em equilíbrio térmico quando uma temperatura T , de probabilidade de estar com energia E , no estado i for conduzida por uma distribuição de Boltzman [131].

Em [132] foi desenvolvido um algoritmo para simulação do comportamento de átomos sobre condição de equilíbrio térmico, considerando uma temperatura fixa. Inicia-se com uma energia E_0 e durante os passos do método há uma perturbação aleatória na disposição atual do sistema como, por exemplo, o movimento de uma partícula para uma nova posição em que essa alteração realizada, uma mudança na disposição do sistema ocorre e uma nova energia E resultante é calculada [131]. Isso resulta em uma variação de energia que é estimada da seguinte (4.16), onde ΔE representa a variação de energia e E_r é a energia resultante da perturbação do sistema. Já E_c trata-se da energia atual, antes do sistema ser perturbado.

$$\Delta E = E_r - E_c \quad (4.16)$$

Se ocorrer $\Delta E \leq 0$, considere-se que, a energia resultante da perturbação do sistema é menor ou igual a energia atual do sistema e, como consequência, a nova disposição do sistema perturbado é adotada, como ponto de entrada para a próxima etapa do algoritmo.

Caso contrário $\Delta E > 0$, a energia da nova disposição do sistema é maior que a energia da disposição atual do sistema, a variação deverá considerar (4.17) como distribuição de probabilidade para alcançar a distribuição de *Boltzman* [131] onde K_B é a constante de *Boltzman*, dada por $1,38064852 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

$$P(\Delta E) = \exp\left(-\left[\frac{\Delta E}{K_B T}\right]\right) \quad (4.17)$$

Para representar uma taxa de resfriamento uma variável R é inserida no sistema, de forma aleatória no intervalo entre 0 e 1 [102, 131]. Essa variável R é comparada ao valor de $P(\Delta E)$, se $R \leq P(\Delta E)$ a nova disposição do sistema perturbado é aceita para servir de entrada para a próxima etapa do algoritmo, caso contrário a configuração perturbada é rejeitada e quem é usada como ponto de entrada para o próximo passo do algoritmo é a disposição atual [131].

O procedimento acima pode ser adotado em problemas de otimização combinatória, onde busca-se determinar uma representação de variáveis $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ que maximize ou minimize uma função objetivo, sendo possível fazer uma analogia entre essa função objetivo e a energia para sistemas físicos, pois ambas podem ser aumentadas ou diminuídas [131].

O algoritmo considera uma solução viável inicial seria perturbada aleatoriamente com a finalidade de melhorar a função objetivo. Tal mecanismo é refeito até que não seja mais possível uma melhoria adicional e respeitando um critério de parada definido previamente. A aceitação das soluções está relacionada com o valor da temperatura que atua como um parâmetro de controle, sendo possível controlar espaço de busca a ser explorado. Quando há uma redução da temperatura, a quantidade de soluções aceitas tende a diminuir, já quando há um aumento da temperatura, essa quantidade tende a aumentar. Dessa forma, é muito importante que quando houver uma redução significativa na temperatura, o algoritmo esteja próximo da solução ótima global. Ainda deve haver um controle sobre o resfriamento para que não ocorra um tempo indevido de esforço computacional. Há uma aproximação das soluções aceitas da distribuição de *Boltzman* em uma determinada temperatura e o sistema é dito estar em “equilíbrio térmico” [131].

O objetivo dessa metaheurística é a realização de busca em vizinhança, por uma única solução, ocorrerão movimentações e haverá um deslocamento para outras regiões, que pertençam ao espaço de busca, baseando-se em sistema termodinâmicos, sendo que no algoritmo existem tanto mecanismos para diversificação quanto para intensificação [131].

A aplicação do algoritmo RS trata-se de uma versão melhorada da otimização local, em que ocorre uma repetição da solução inicial e ela passa por alterações locais até que não haja solução melhor gerada. Através de um processo de geração de números aleatórios, que atua sobre a solução gerada, mudanças diversidade das soluções são executadas para tentar evitar estagnar em uma solução pobre [102]. O movimento para soluções é na concepção de que talvez através da ida para uma solução pior seja possível chegar a uma solução melhor. Conforme as iterações são continuadas, existe uma tendência menor do algoritmo aceitar soluções piores através da probabilidade associada à distribuição de *Boltzman*, que irá auxiliar na seleção das soluções e no final apenas as soluções melhores são aceitas.

Devido à essa habilidade em escapar de ótimos locais existe uma expectativa de encontrar resultados consideravelmente melhores. O diferencial do RS é o retorno para movimentos antigos ou soluções não tão atraentes, que possam reduzir o valor da função objetivo e que na otimização local não é possível voltar atrás avançando para o melhor custo da função gerada. Tal estratégia do algoritmo de RS é adotada pela geração de valores aleatórios e um parâmetro de controle chamado temperatura [102].

4.7 Híbrido GRASP e RS adaptado

Para aplicação no projeto da estrutura com guia de ondas com curvatura e com cruzamento de 4 pontos, os algoritmos Grasp e RS foram combinados e foram selecionadas algumas etapas de ambos os algoritmos, que se aproximam mais dos objetivos textcolorreddessas geometrias, sendo esquematizado no fluxograma da Figura 4.7 e descrito em cada tópico a seguir.

1. Definição de uma variável temperatura: A temperatura foi considerada igual a 200 pois é a quantidade de gerações definida inicialmente e ela vai sendo reduzida até chegar a 0 sendo finalizada a execução do programa. A variável temperatura é utilizada para controlar a aceitação das soluções pioradas, essa variável vai sendo reduzida ao longo das gerações. A variável temperatura inicia com um valor alto e essa temperatura é reduzida conforme as gerações vão aumentando. Trata-se de uma variável de controle para o sistema termodinâmico, que de forma análoga vai controlar o sistema de otimização, através dela vai ser possível aceitar ou rejeitar valores da função objetivo, por meio de uma probabilidade calculada.
2. Construção de soluções do sistema termodinâmico: Soluções viáveis ou estados do sistema termodinâmico são construídas inicialmente aleatoriamente de acordo com um intervalo definido previamente.

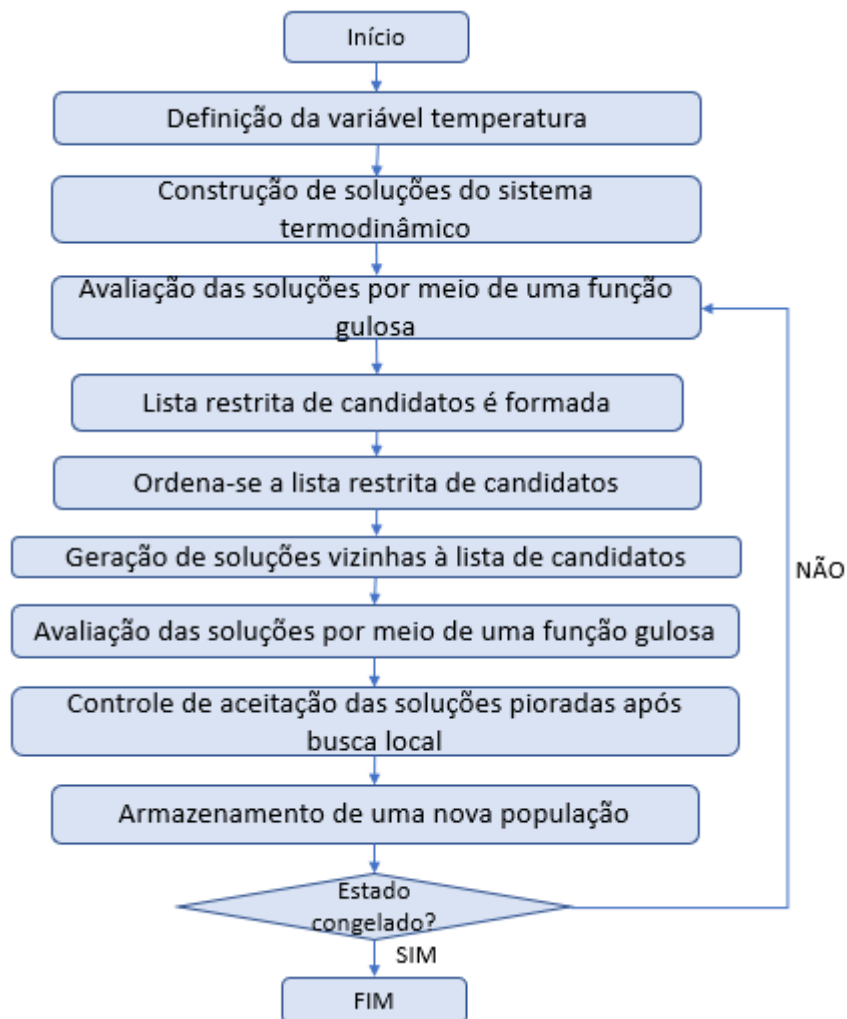


Fig. 4.7: Fluxograma do Algoritmo Híbrido

3. Avaliação das soluções por meio de uma função gulosa: As soluções são avaliadas por meio de uma função gulosa (P_{out}/P_{in}).
4. Lista restrita de candidatos é formada: Uma lista restrita de candidatos é formada de acordo com os parâmetros de k e μ , sendo que os valores de μ foram gerados no intervalo de 0 a 1 e o valor de k , que depende do valor de μ é calculado conforme (4.15). Os parâmetros k e μ são usados para controlar a quantidade de indivíduos que está presente na lista restrita de soluções. Só estarão presentes na lista as soluções com as eficiências estejam no intervalo de $E(i) \in [k, E_{max}]$. O valor mínimo de eficiência que deve ser mantido na lista restrita de candidatos foi determinado pelo cálculo do valor k .
5. Ordena-se a lista restrita de candidatos: De acordo com os valores das funções gulosas obtidas anteriormente no caso do problema trabalhado, as melhores eficiências ou candidatos com maiores valores de função gulosa são inseridos no início da fila.
6. Geração de soluções vizinhas à lista de candidatos: Para investigar outras soluções geram-se candidatas próximas (vizinhas) às da lista restrita de candidatos, que são migradas para outras soluções através de movimentações pequenas nas coordenadas dessa lista restrita de candidatos. Essa mudança nas soluções representaria uma mudança no estado do sistema termodinâmico.
7. Controle de aceitação das soluções pioradas após busca local: Uma busca local é realizada com base nas soluções vizinhas e há comparações das soluções da lista restrita de candidatos do passo anterior com soluções geradas nas proximidades. Se a solução vizinha for capaz de melhorar o valor da função gulosa, ela é guardada para a lista, caso contrário passa por um processo probabilístico para que soluções pioradas sejam aceitas por meio de uma função exponencial $P(\Delta E) = \exp(-[\frac{\Delta E}{k_B T}])$ que é associada à distribuição de *Boltzman*, ela realiza o controle e aceitação das soluções pioradas à medida que o valor da temperatura é reduzido ao longo das gerações e ocorrerá também a aceitação das soluções pioradas, ou seja, quando a temperatura T aumenta, a probabilidade de aceitar um movimento ruim aumenta e quando T diminui a probabilidade aceitar um movimento ruim diminui. Quando chega-se a temperatura zero não são mais aceitos movimentos ruins. Uma taxa de resfriamento R gerada aleatoriamente no intervalo de 0 a 1 é comparada com o valor de $P(\Delta E)$, se $R \leq P(\Delta E)$ a nova disposição do sistema perturbado é aceita e servirá de entrada para a próxima etapa do algoritmo, sendo que (ΔE) trata-se da variação de energia do sistema termodinâmico, que representa a variação da eficiência de transmissão, fornecida pela solução vizinha menos a solução atual.
8. Armazenamento de uma nova população: A finalização se dá com o estado congelado, onde não haverá mais mudanças na temperatura.

Obs.: Uma vez que na aplicação do método GRASP não há conhecimento das iterações anteriores, essa etapa não foi utilizada no método híbrido. O que vai maximizar a transferência de potência no guia é uma combinação de fatores associada ao número de iterações do algoritmo inteligente, assim como os passos vinculados à técnica aplicada.

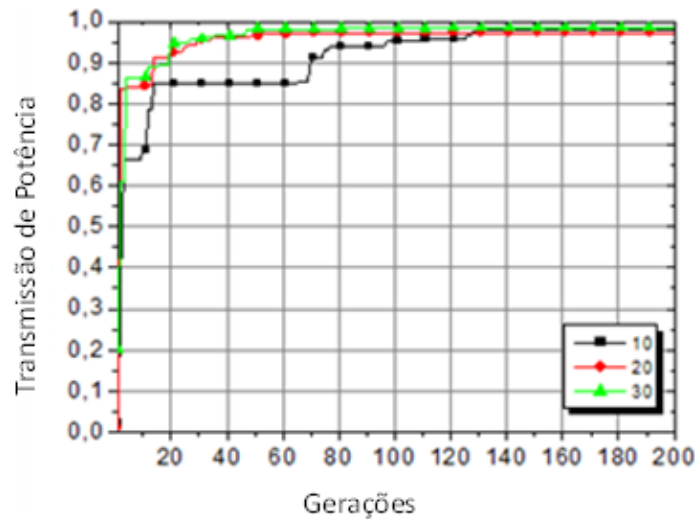
5. RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos por meio das simulações realizadas nas estruturas com guias de ondas com curvatura e cruzamento utilizando as metaheurísticas AM e o híbrido GRASP - RS para o guia com curvatura, além dos algoritmos de PSO e LC para os cruzamentos com variações de 2 e 4 pontos, respectivamente, e também o híbrido GRASP e RS para o cruzamento com variações de 4 pontos assim como o uso do MEF-2D, para obtenção da relação entre a potência de saída e a potência de entrada (P_{out}/P_{in}). Para cada geração, foram gastos em média 2 minutos, para o AM e o PSO, 3 minutos para o LC e 5 minutos para o híbrido GRASP-RS, em um processador Intel (R) Core i7-7500 CPU a 2,70 GHZ, memória RAM de 16GB, HD de 2TB e o critério de parada foi um número definido para cada problema de quantidade de gerações. Foram analisadas em média de 500 a 2000 configurações do total de geometrias possíveis de serem testadas, para cada estrutura utilizada neste trabalho. As estruturas, que foram usadas para iniciar o processo de otimização, serviram como base para geração de estruturas com outros parâmetros geométricos, por isso foram geradas outras eficiências de transmissão diferentes das estruturas base e com isso é possível observar nos gráficos de evolução de eficiência valores iniciando abaixo de 50%, ainda que as estruturas base, que foram utilizadas, tenham no mínimo 50% de eficiência de transmissão.

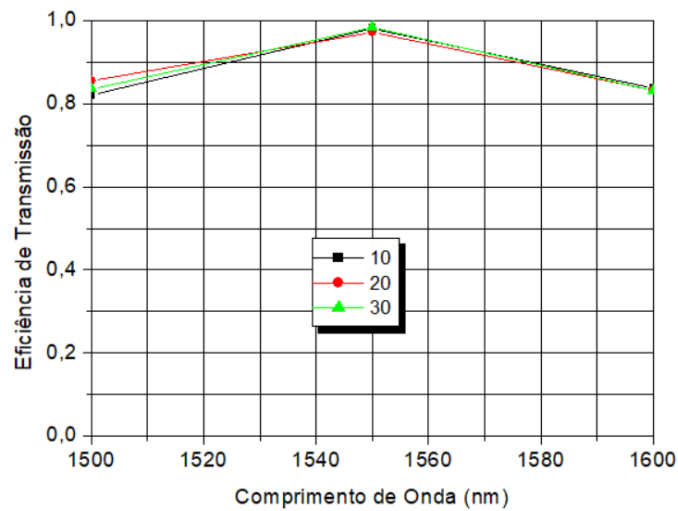
5.1 *Algoritmo AM para o guia de ondas com curvatura*

Os parâmetros geométricos da estrutura de curvatura foram encontrados com o AM de otimização de estruturas proposto e como consequência foi possível avaliar a transferência de potência associada a um conjunto de parâmetros geométricos, que compõe o arranjo com curvatura, além disso foi possível analisar o comportamento de guias de ondas com curvatura através do MEF 2D. A estratégia adotada apresenta um resultado exitoso com eficiência de transmissão acima de 98%. Este trabalho comprova a eficiência do método escolhido, principalmente porque o AM é adaptável ao tipo de problema em questão e suas operações são de fácil manipulação, o que facilitou a implementação. Um dos procedimentos que foi de fundamental importância no resultado foi a busca local, tanto para o AM, como para os outros algoritmos. Ela é o diferencial do AM, pois produz novas possibilidades de soluções na vizinhança das soluções geradas, o que reduz o esforço computacional, na medida que pode encontrar melhores indivíduos em menos tempo, pois faz comparação entre cada solução e suas vizinhanças, antes de passar para próximas etapas, o que leva a uma convergência mais rápida, devido uma tendência da população de indivíduos ser direcionada para um ótimo local de maior proximidade. Além disso, a escolha adequada de parâmetros geométricos, para a composição dos cantos das curvaturas foi essencial para evitar encontrar geometrias com valores de função objetivo muito baixas ou até

arranjos impossíveis de construir.



(a)



(b)

Fig. 5.1: (a) Evolução da eficiência de transmissão, em relação ao número de gerações, para as melhores soluções do AM, quando consideradas populações de 10, 20 e 30 indivíduos, utilizando o comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. e (b) Potências de transmissão para comprimentos de onda na faixa de 1500 nm a 1700 nm, considerando também as 3 populações.

A Figura 5.1(a) apresenta a evolução da eficiência de transmissão para os melhores indivíduos das populações 10, 20 e 30, com a utilização do AM e cada cor está associada a uma das populações. Mudanças na eficiência de transmissão foram observadas, quando o tamanho das populações foi alterado. A população de 30 indivíduos resultou no maior valor de eficiência de transmissão, atingindo 98,52% e comportamento evolutivo muito semelhante ao da população de 20 indivíduos. Embora a população de 20 indivíduos tenha apresentado um valor de eficiência de transmissão menor do que a população de 10 indivíduos, chegando a 97,15% para $\text{pop} = 20$ e 98,22% para $\text{pop} = 10$, a população de 20 indivíduos apresentou uma sequência de valores de eficiência de transmissão crescentes ao longo das gerações, enquanto a população de 10

indivíduos não evoluiu da geração 10 até a geração 70 e por volta da geração 130, os valores de eficiência de transmissão para as três populações tornaram-se constantes até a última geração. Com esses dados, é possível observar que o tamanho da população teve influência decisiva na diversidade dos indivíduos, ou seja, quanto maior a população, mais variados os valores de eficiência de transmissão obtidos, o que gerou a possibilidade de analisar um maior número de configurações de estrutura.

Já na Figura 5.1(b), é possível observar que para as três populações no valor de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ apresentaram a melhor eficiência de transmissão, ou seja, onde ocorrem menos perdas. Os valores de comprimento de onda, que estão mais distantes de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, tendem a reduzir os valores de eficiência de transmissão. As mudanças de 5 pontos na estrutura de base foram avaliadas para as populações de 10, 20 e 30 indivíduos.

Para avaliar a convergência do AM, ele foi executado mais 1 vez, sob a seguinte condição: uma população de 10 indivíduos e uma das condições da mutação adaptativa considerada para as outras simulações foi modificada, se a eficiência de transmissão gerada fosse menor que 90%, no lugar de alterar 20% das coordenadas como realizado nas outras simulações, é realizada uma alteração de 30% na quantidade de coordenadas e caso a eficiência fosse maior ou igual a 90%, uma quantidade de 2% de coordenadas é alterada. Com tal alteração foi possível obter um resultado um pouco maior para a eficiência de transmissão, alcançando 98,89%, sendo superior aos resultados encontrados pelo mesmo algoritmo nas 3 simulações realizadas para a estrutura de curvatura. Segue a Figura 5.2 com o gráfico de evolução da eficiência de transmissão em relação ao número de gerações executado.

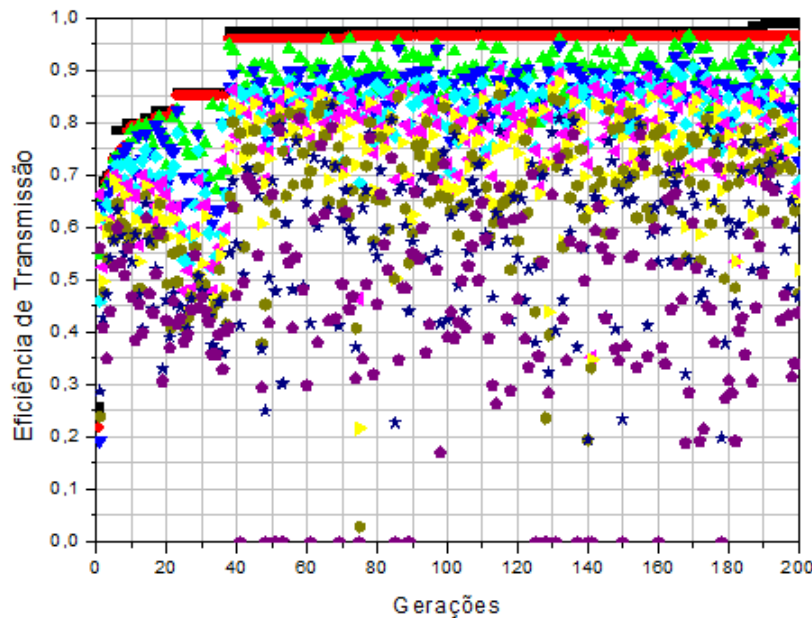


Fig. 5.2: Relação entre a eficiência de transmissão e o número de gerações para AM e mutação adaptativa com condições diferentes, para verificação de convergência.

As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam os valores de coordenadas obtidos após o processo de otimização para as populações de 10, 20 e 30 indivíduos e para a população de 10 com mutação adaptativa em condições diferentes, respectivamente considerando o comprimento de onda de $\lambda = 1,55\mu\text{m}$.

Tab. 5.1: 5 pontos e população 10.

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,2332	-0,1	0,1	0,2388	-0,1	2,3728	-0,2708	0,2949	-2,3552	0,1

Tab. 5.2: 5 pontos e população 20.

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,2481	-0,1	0,1	0,1875	-0,1	2,4804	-0,2423	0,3023	-2,290	0,1

Tab. 5.3: 5 pontos e população 30.

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,2159	-0,1	0,1	0,232	-0,1	2,3474	-0,2741	0,2789	-2,4097	0,1

Tab. 5.4: 5 pontos, população 10, mutação adaptativa com condições diferentes

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,2243	-0,1	0,1	0,2078	-0,1	2,4076	-0,2605	0,28659	-2,3287	0,1

As Figuras 5.3 (a),(b),(c) representam uma escala que mostra a intensidade do campo na entrada e na saída do guia de ondas para cada uma das populações analisadas, demonstrando uma transferência de potência de 98,52%.

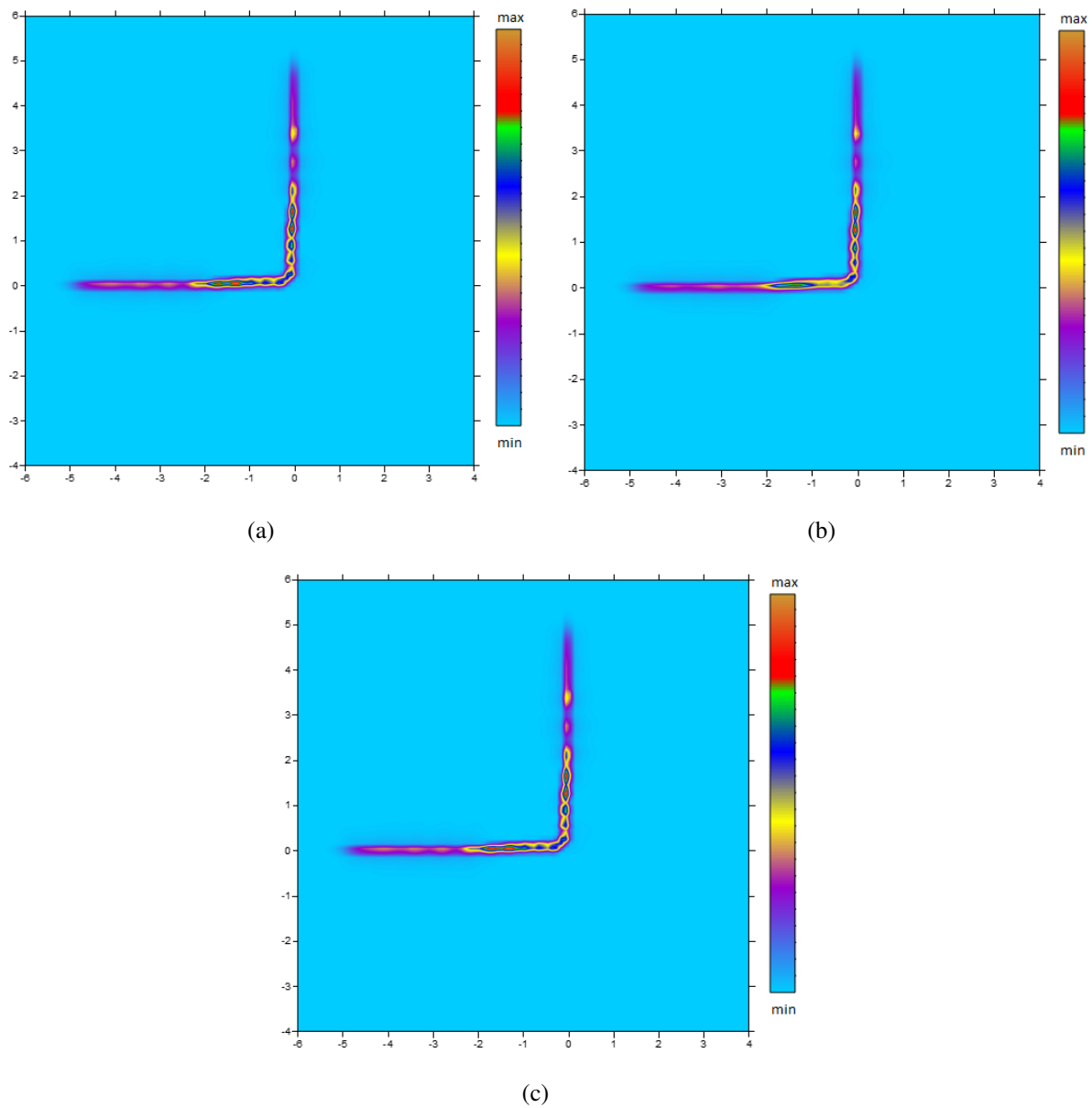


Fig. 5.3: Distribuição espacial do campo elétrico obtida pelo AM, considerando as populações de (a) 10 indivíduos, (b) 20 indivíduos e (c) 30 indivíduos, respectivamente.

5.2 Algoritmo híbrido para o guia de ondas com curvatura

Foram simulados guias de ondas com curvatura através do algoritmo híbrido juntamente com o MEF 2D e foram obtidos como resultados valores de eficiência acima de 98%, indicando uma estratégia eficaz para melhoria do desempenho da estrutura analisada.

Nas Figuras 5.4(a),(b) e(c) os resultados da relação entre o número de gerações e a eficiência de transmissão para os valores de μ obtidos nas 3 simulações realizadas, associados aos maiores valores de eficiência de transmissão obtidos. Percebe-se na Figura 5.4 que os melhores configurações resultantes de cada uma das 200 gerações. Sendo que em cada uma das gerações simuladas existem 10 soluções e cada uma delas é representada por uma cor diferente. Uma vez que foi utilizado um algoritmo híbrido e muitos passos associados a esse algoritmo foram aplicados, tentando evitar a obtenção de soluções ruins desde o início das gerações, percebeu-se que alguns valores de eficiência de transmissão iniciaram com valores acima de 80%. Os valores dos parâmetros geométricos associados ao $\mu=0,9$ estão representados na Tabela 5.5.

Tab. 5.5: 5 pontos e população 10.

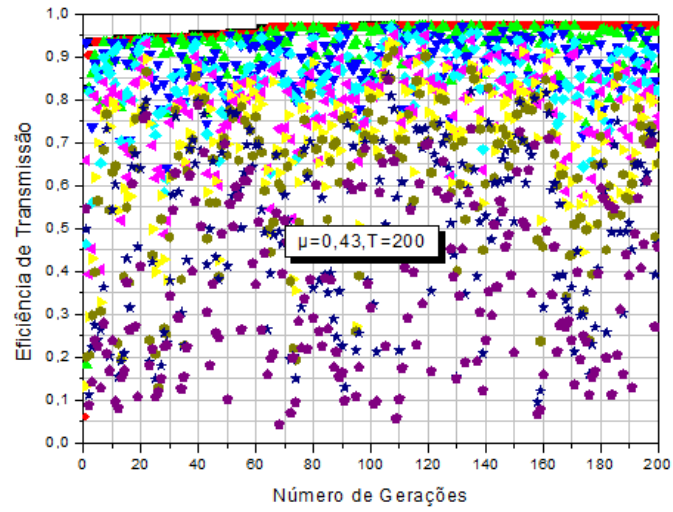
$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$	$x_5(\mu\text{m})$	$y_5(\mu\text{m})$
-0,2056	-0,1	0,1	0,2340	-0,1	2,3925	-0,2705	0,2784	-2,3953	0,1

Para verificar a convergência do algoritmo híbrido aplicado ao problema da curvatura foi executado mais uma vez, mas os resultados não foram melhores aos já obtidos. O resultado da simulação é representado na Figura 5.5.

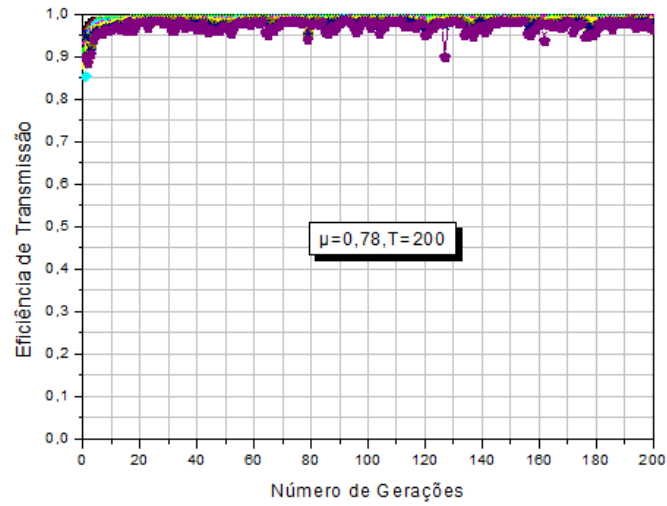
A combinação de algumas etapas dos métodos Grasp e RS foram decisivas para alcançar eficiências acima de 98%. À medida que a temperatura foi sendo reduzida, os valores de eficiência muito baixos associados às estruturas foram sendo rejeitados em maior escala. Além disso, a lista de candidatos restrita também foi essencial para manter as estruturas, que tivessem um valor mínimo de eficiência associado e a busca na vizinhança da lista restrita de candidatos para alcançar valores maiores de eficiência, que os já até então encontrados. Movimentos associados a um cálculo probabilístico para aceitação ou rejeição de soluções candidatas foram adotados para evitar ao máximo encontrar soluções com baixos valores de transmissão.

Ao analisar as Figuras 5.4(a),(b),(c) é possível observar que para a constante $\mu=0,4$, a evolução das estruturas apresentou um comportamento mais diversificado, ao comparar com $\mu=0,78$ e $0,9$, o que era esperado, uma vez que o valor de μ impacta no resultado do valor de k e o valor de k faz parte do intervalo mínimo dos valores de eficiência em que as soluções escolhidas para permanecerem na lista restrita da candidatos deve possuir.

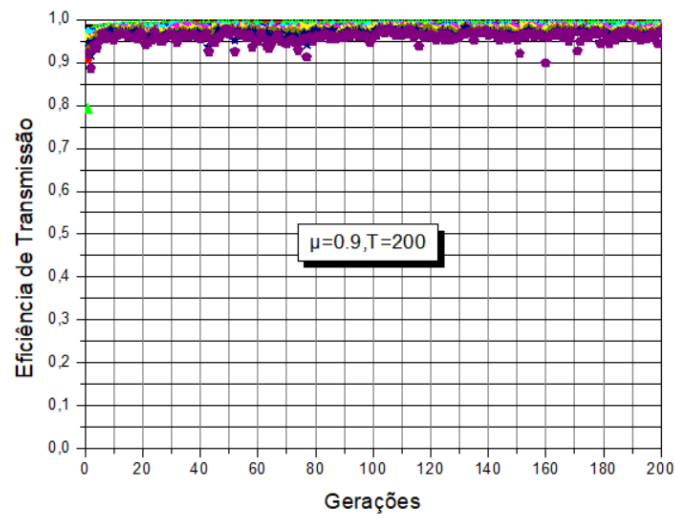
Nas Figuras 5.4 (a),(b),(c) foram destacados os resultados com os μ 's provenientes dos maiores valores de eficiências obtidos. É possível observar que entre os μ 's gerados da simulações com o algoritmo híbrido,



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.4: Relação entre o número de gerações e a eficiência de transmissão, considerando a estrutura da curvatura com o algoritmo híbrido, para (a) $\mu=0,43$ (b) $\mu=0,78$ e (c) $\mu=0,9$.

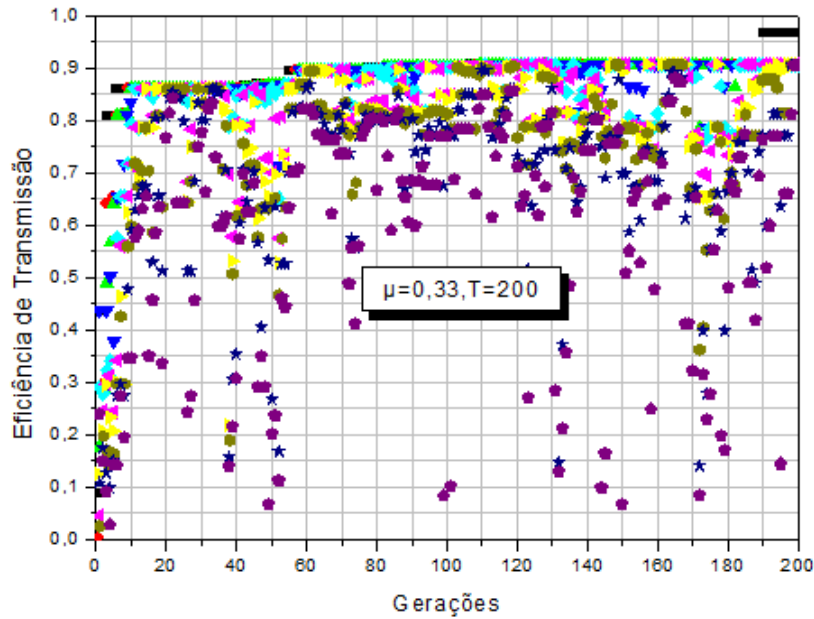


Fig. 5.5: Relação entre a eficiência de transmissão e o número de gerações para algoritmo híbrido, para verificação de convergência.

a diversidade das soluções foi maior com o $\mu = 0,43$ e os μ 's 0,78 e 0,9 tiveram comportamentos relativamente semelhantes, ao decorrer das gerações. O valor de μ gerado de forma aleatória no intervalo de $[0,1]$ com igual probabilidade de ocorrer em todo o intervalo destacado e determina o valor de k , pois k depende do resultado de μ . Sendo assim quanto menor o valor de μ , menor será o valor de k gerado e dessa forma o valor mínimo exigido de eficiência para estar no intervalo $E(i) \in [k, E_{max}]$ será menor, o que vai gerar um número de maior de candidatos que estarão na lista restrita e dessa forma, uma maior diversidade de soluções para menores valores de μ , mas não necessariamente os maiores valores de eficiência associados, pois isso dependerá do conjunto de parâmetros geométricos gerados para cada μ . Para $\mu=0,43$, o resultado da eficiência de transmissão foi de 97.3%, para $\mu=0,78$ foi de 98.62% e para $\mu=0,9$ foi de 98.66%, ou seja, nesse caso específico, os valores de μ mais próximos de 1, apresentaram maiores eficiências de transmissão.

São apresentadas na Figura 5.6 as distribuições espaciais dos campos associados, respectivamente para $\mu=0,43$, 0,78 e 0,9. Além das simulações, considerando o comprimento de onda no valor de $1,55 \mu\text{m}$, as estruturas também foram testadas no intervalo entre $1,50 \mu\text{m}$ e $1,60 \mu\text{m}$ e o resultado está apresentado na Figura 5.7. Observe que o maior valor de eficiência de transmissão foi atingido quando o comprimento de onda é $1,55 \mu\text{m}$. Do intervalo entre $1,50$ até $1,55 \mu\text{m}$ ocorre um crescimento na eficiência de transmissão e após $1,55 \mu\text{m}$ e os valores começam a diminuir até chegar em $1,60 \mu\text{m}$. Para cada um dos 10 indivíduos gerados no final das gerações executadas foi avaliado o desempenho no intervalo de comprimento de onda de $1,50 \mu\text{m}$ até $1,60 \mu\text{m}$. Tais resultados estão representados pela Figura 5.8. Pode ser observada uma variação na eficiência para esse espectro de frequência de 84% para 98,66%, o que era esperado.

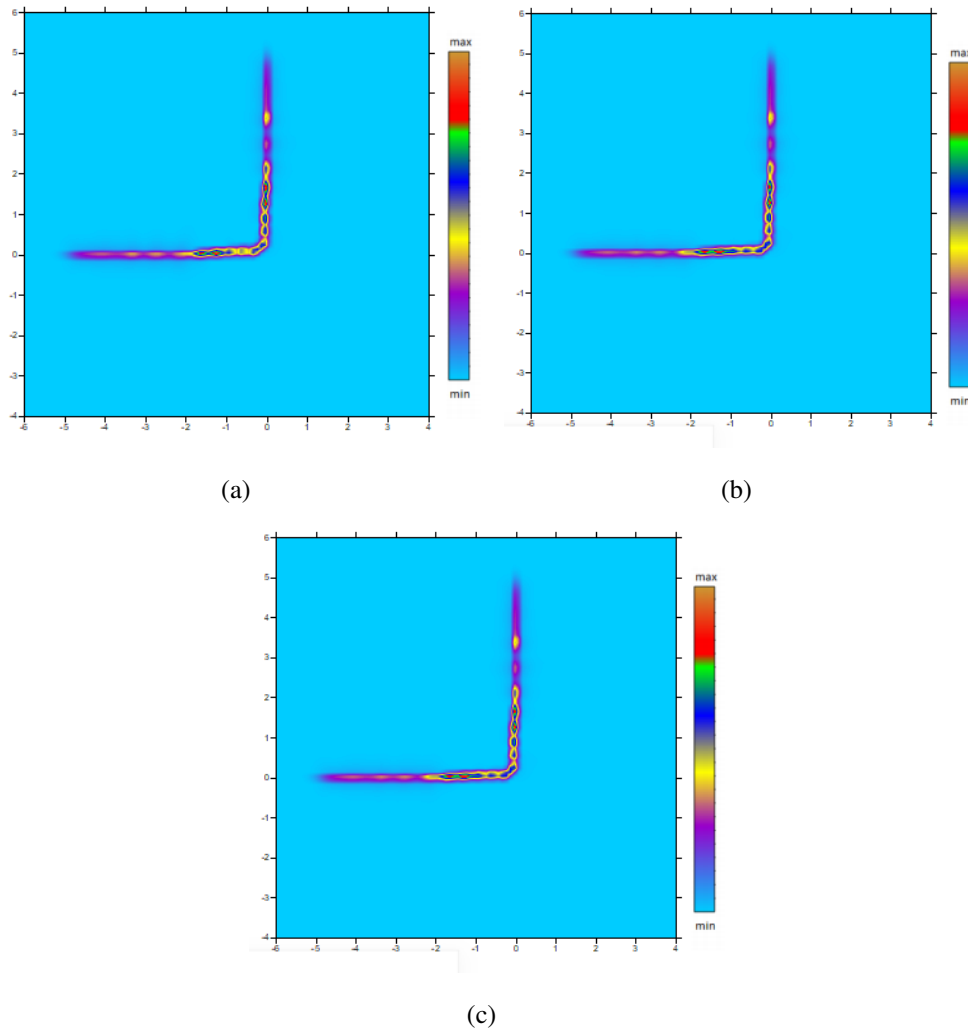


Fig. 5.6: Distribuição espacial do campo elétrico da estrutura otimizada para (a) $\mu=0,43$ (b) $\mu=0,78$ e (c) $\mu=0,9$, obtida pelo algoritmo híbrido.

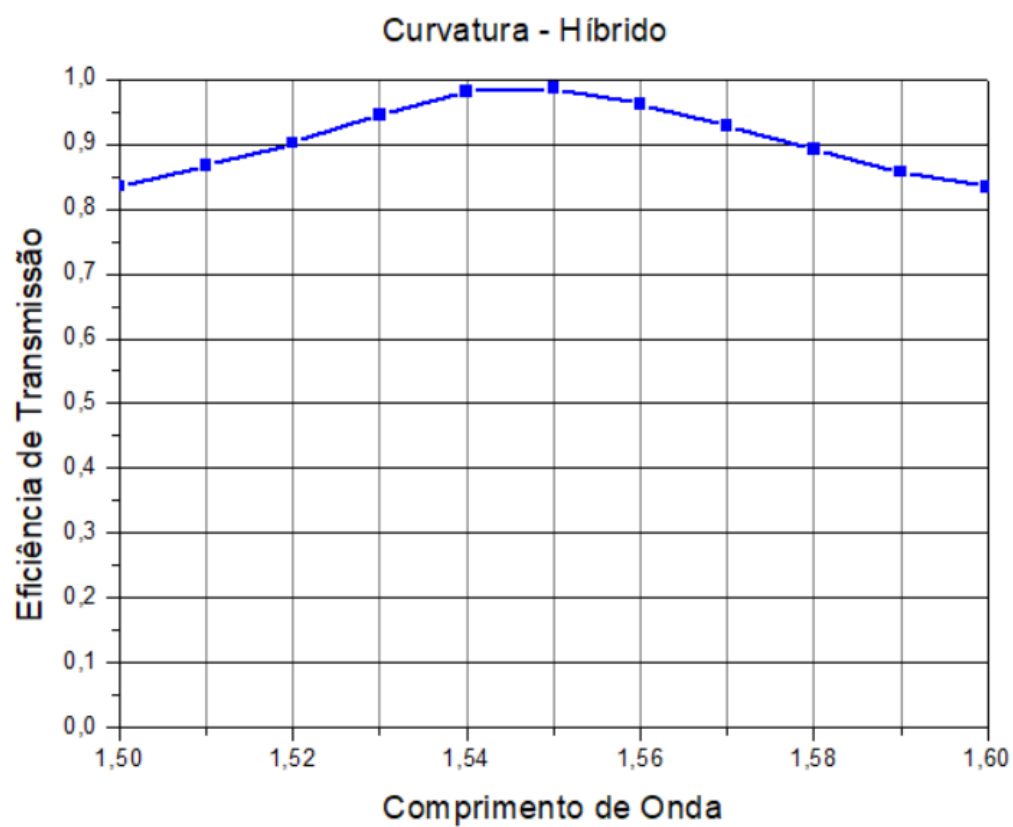


Fig. 5.7: Relação entre os comprimentos de onda e a eficiência de transmissão.

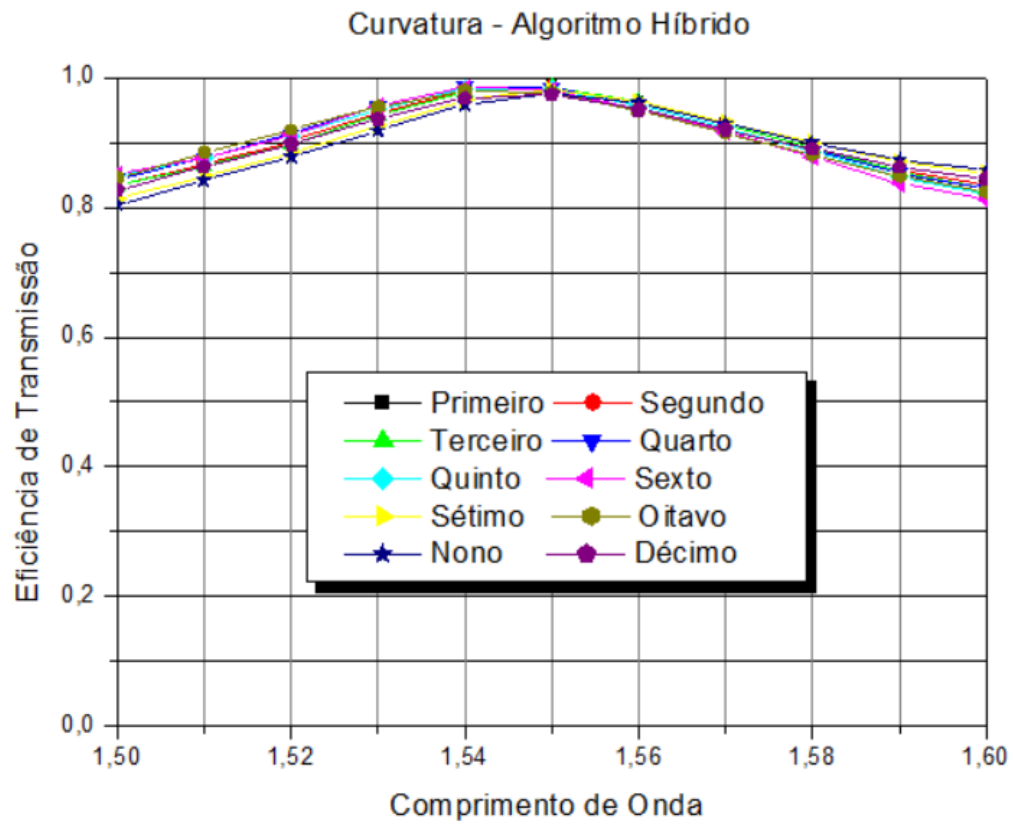


Fig. 5.8: Relação entre os comprimentos de onda e a eficiência de transmissão para a curvatura e usando o algoritmo híbrido, considerando cada indivíduo.

5.3 PSO para o guia de ondas com cruzamento

A combinação de MEF 2D com o algoritmo de otimização por enxame de partículas adaptado e foi possível obter valores de eficiência de transmissão acima de 95%, comprovando que o método foi eficaz para resolver o problema de otimização do cruzamento de guias de ondas 2D. Considerando os recursos disponíveis no algoritmo baseado em partículas relatados nos procedimentos, foi possível analisar estruturas e decidir qual seria a estrutura ideal para o problema proposto, modificando os parâmetros geométricos das estruturas. Foram executadas 50 gerações, nos primeiros testes e para verificação de convergência 200 gerações.

A Figura 5.9 (a) e (b) mostram a evolução dos algoritmo de PSO utilizado para otimizar a estrutura de cruzamento, demonstrando o sucesso na implementação do algoritmo e é possível observar que ele possui uma convergência muito rápida, portanto, o número de gerações não foi ampliado. Nas figuras é são apresentadas as relações entre o número de gerações e a eficiência de transmissão associada aos valores de $c=1$ e (b) $c=1,1$. Cada indivíduo, associado às gerações está representado por uma cor.

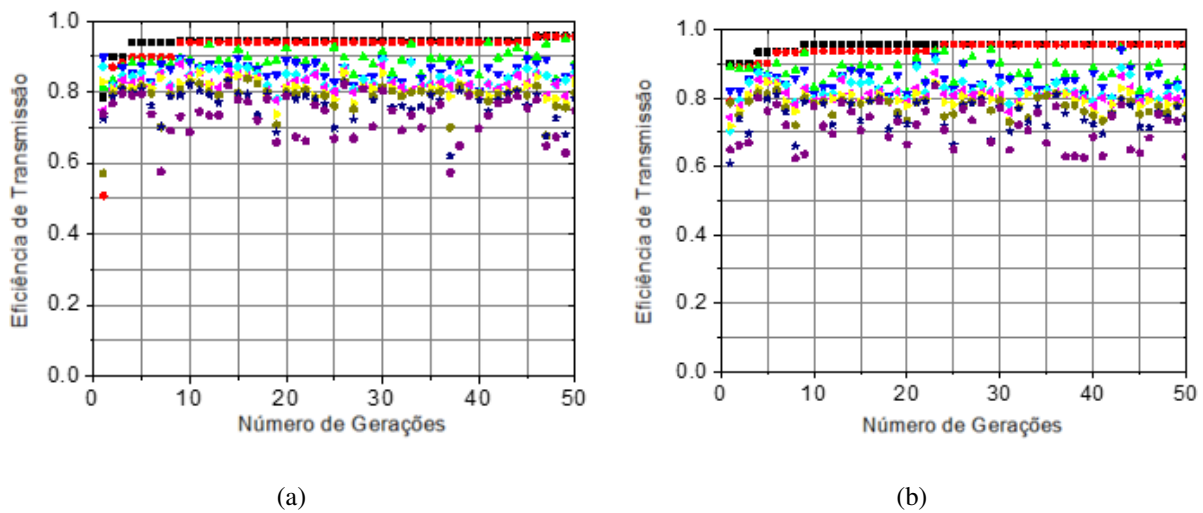


Fig. 5.9: (a) Evolução das gerações de partículas e as eficiências de transmissão associadas, usando o comprimento de onda de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. (a) $c_1=1$ e (b) $c_2=1,1$.

Os valores de potência de saída encontrados, utilizando a constante $c=1$, foram: $P_2 = 0,67\%$, $P_3 = 95,74\%$ e $P_4 = 0,67\%$. De outra forma, os valores de potência de saída encontrados, utilizando a constante $c=1,1$, foram: $P_2 = 0,67\%$, $P_3 = 95,76\%$ e $P_4 = 0,67\%$, sendo assim é possível concluir, que não houve muita mudança no valor das potências de saída, isso pode ser explicado também pelas melhores estruturas resultantes obtidas pelo processo de otimização, a única variação em termos de coordenadas, pode ser verificada na Figura 5.11 (a) e (b), onde são apresentadas as figuras após o processo de otimização, as geometrias resultantes são muito semelhantes e houve apenas a mudança de um único ponto através de um dos valores das coordenadas de $3,56 \mu\text{m}$ para $3,59 \mu\text{m}$, considerando o valor de x , para o ponto 1. Na Figura 5.9, foi possível perceber que a melhor eficiência de transmissão alcançada foi ao utilizar a constante $c=1,1$, o que

demonstra que, ao atualizar as velocidades e posições das coordenadas tem-se um efeito positivo no valor da transferência de potência, pois são avaliadas novas geometrias e isso pode resultar em valores de eficiência de transmissão diferenciados.

Para validar a convergência do algoritmo, ele foi executado novamente com uma quantidade de gerações de 200 e com $c=1,1$. Ainda que houve um aumento do número de gerações para 200 gerações, o valor de eficiência de transmissão não teve muita alteração em relação às execuções anteriores, o valor obtido foi de 95,21%. Segue a Figura 5.10 apresentando a relação entre o número de gerações e a eficiência de transmissão.

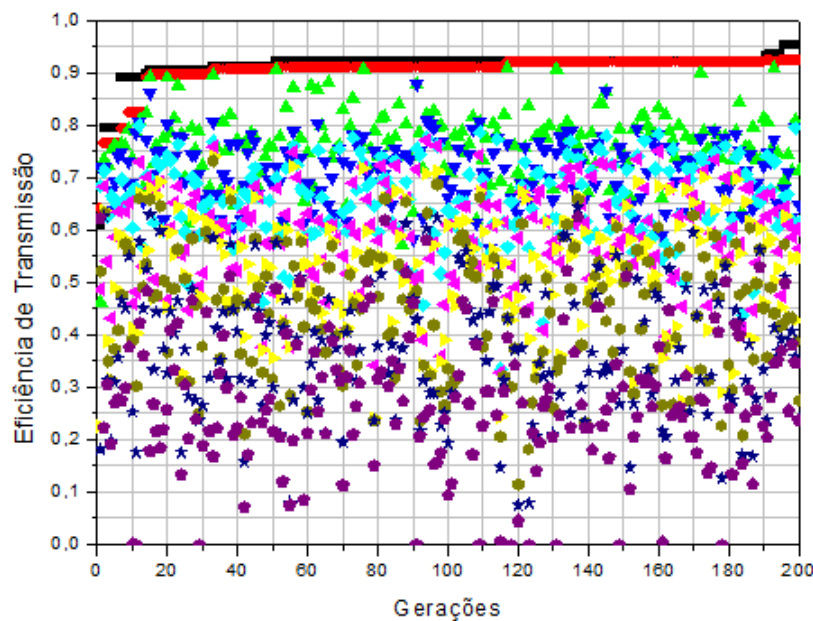


Fig. 5.10: Eficiência de transmissão em função das gerações.

Na Figura 5.11(a) e (b) são apresentados os cruzamentos obtidos após o processo de otimização.

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 seguem os parâmetros geométricos associados à constante c , obtidos após o processo de otimização.

Tab. 5.6: Para $c = 1,0$

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$
-3,56	0,20	-0,22	0,11

Ao alterar o valor da constante associada ao processo de alteração das posições das coordenadas, a estrutura inicial foi modificada a cada iteração do algoritmo e foi possível observar que, houve uma melhoria da estrutura inicial, o que prova que a combinação do método de exame de partículas adaptado e do MEF pode

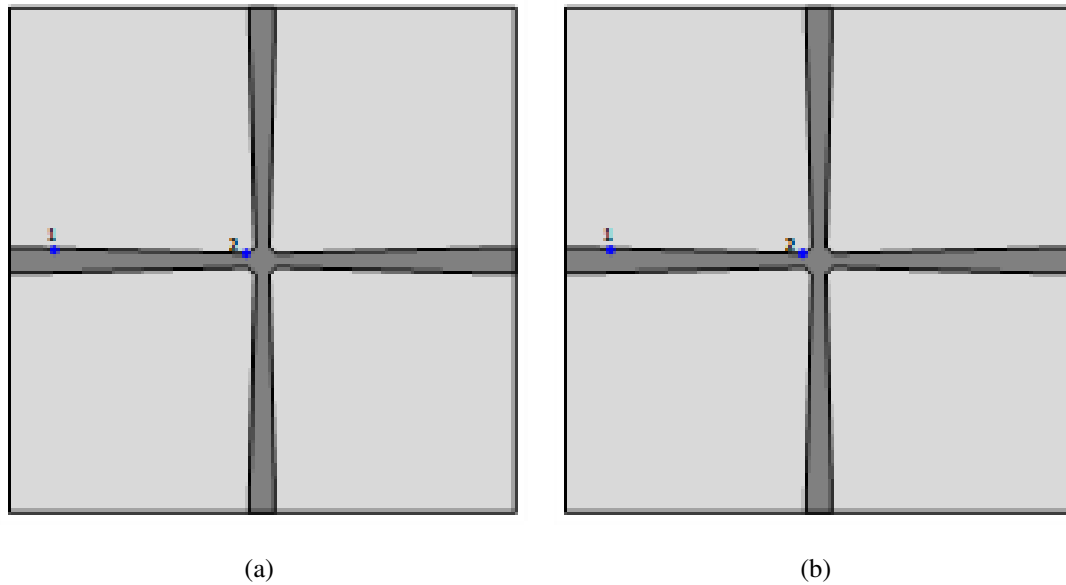


Fig. 5.11: Cruzamento otimizado com (a) $c = 1,0$ e (b) $c = 1,1$.

Tab. 5.7: Para $c = 1,1$

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$
-3,59	0,20	0,22	0,11

ser utilizada com sucesso em problemas de otimização de estruturas.

Ao executar o algoritmo é possível, tanto melhorar quanto piorar a posição das partículas, já que está sendo feito o uso da aleatoriedade. Ao final das iterações, há uma melhoria nas estruturas finais, pois há uma grande varredura de valores dentro da faixa de coordenadas possíveis e, além disso, atualizações das velocidades e posições das partículas, de acordo com os valores de eficiência de transmissão associados, são fundamentais para explorar uma variedade de soluções candidatas.

A distribuição espacial do campo elétrico obtida pelo PSO é apresentada na Figura 5.12(a),(b). É possível observar que 95,76% da potência é transferida de P_1 para P_3 .

A transmissão em função do comprimento de onda é apresentada na Figura 5.13 e o cruzamento exibe uma transmissão de potência acima de 90%, em todo o intervalo de comprimento de onda de 1,50 até 1,60 μm .

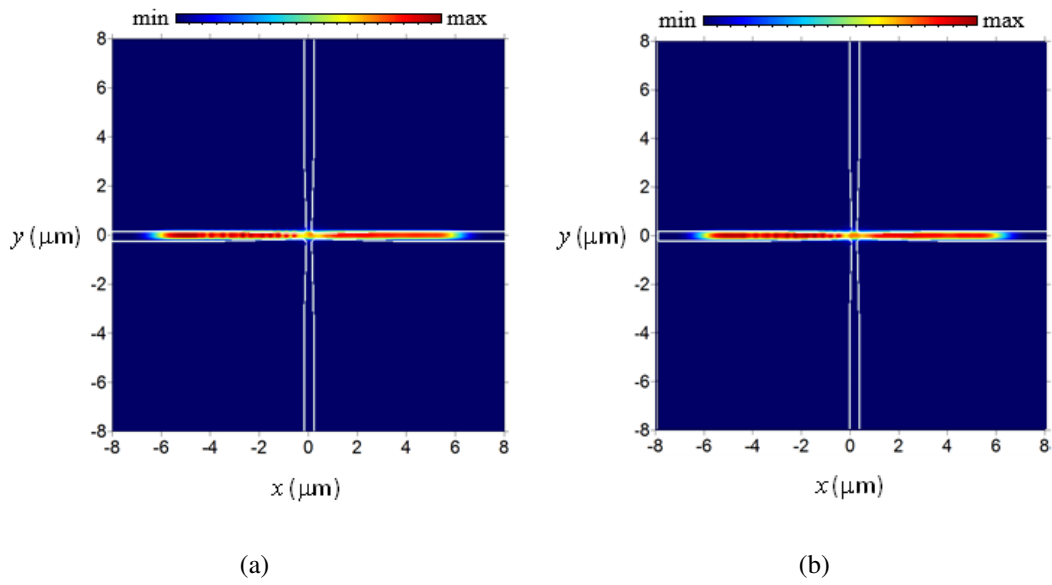


Fig. 5.12: Distribuição espacial do campo elétrico para o cruzamento otimizado com (a) $c = 1$ (b) $c = 1,1$ obtida pelo PSO.

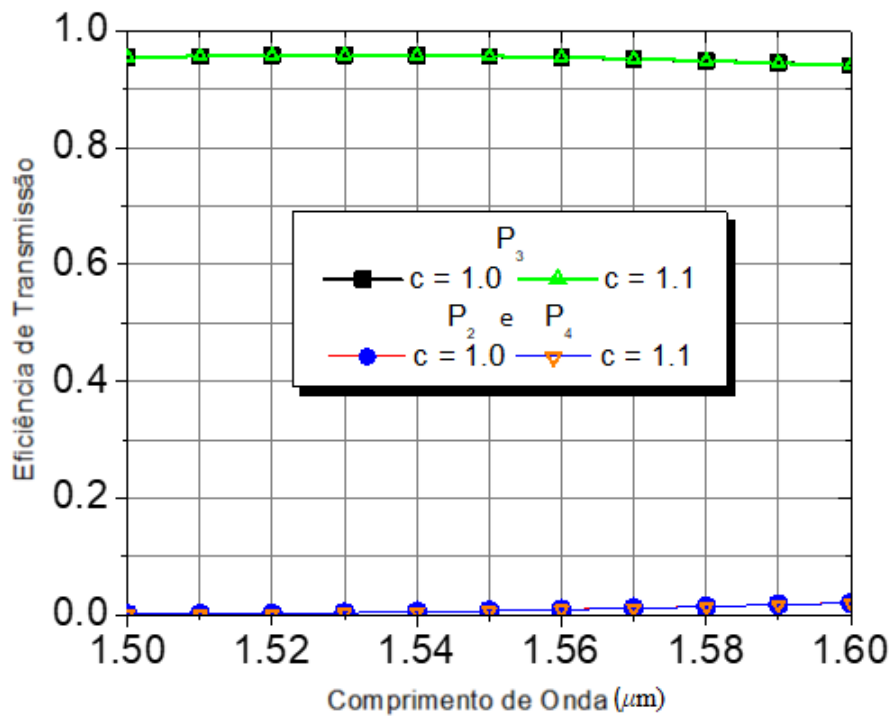


Fig. 5.13: Eficiência de transmissão em função do comprimento de onda.

5.4 Algoritmo de LC aplicado ao guia de ondas com cruzamento

O algoritmo LC foi utilizado em conjunto com o MEF e a eficiência acima de 97% foi alcançada, comprovando que as ferramentas de otimização escolhidas tiveram sucesso ao encontrar uma geometria de cruzamento de guias de ondas eficiente. Centenas de estruturas foram analisadas durante a execução do algoritmo e cada uma delas foi avaliada. Ao atingir o critério de parada escolhido, que foi de 200 gerações, foi possível obter a geometria otimizada final.

Na Figura 5.14 é possível verificar uma relação entre o número de gerações e a eficiência de transmissão, houve uma evolução dos valores de transmissão encontrados. Como as escolhas dos melhores lobos foram feitas de forma bastante criteriosa, desde os primeiros passos do algoritmo foi possível identificar uma convergência rápida. A faixa de comprimento de onda de $1,4\mu\text{m} - 1,6\mu\text{m}$ para a melhor solução foi avaliada e a eficiência máxima de 97,5% foi alcançada em $1,53\mu\text{m}$, ver Figura 5.18.

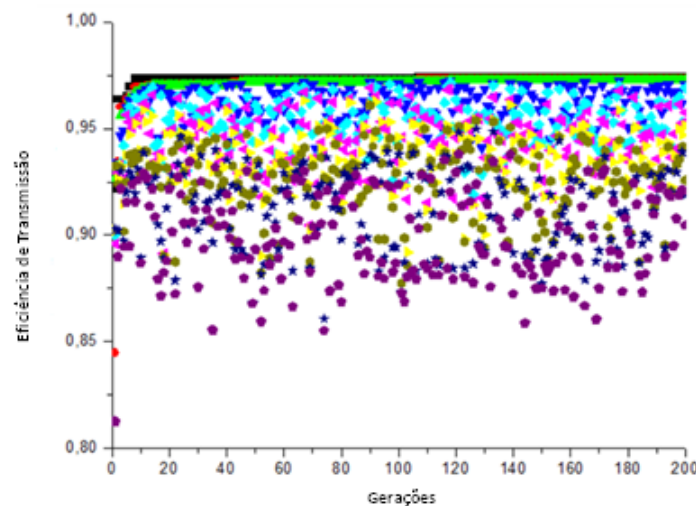


Fig. 5.14: Evolução dos lobos em função das gerações.

As etapas estabelecidas no algoritmo LC foram capazes de melhorar a geometria inicial, com destaque para as etapas de seleção dos 3 melhores lobos α, β, δ , onde é possível armazenar candidatos associados às melhores eficiências, além disso a aplicação do cálculo da média ponderada, foi capaz de tornar mais justo o processo de escolha dos indivíduos, de acordo com as contribuições que cada lobo é capaz de fornecer para o grupo.

Durante a execução da técnica, devido à aleatoriedade, é possível encontrar estruturas boas e ruins, portanto uma seleção adequada é essencial, para não perder geometrias potenciais. Para o comprimento de onda de 1550 nm foi possível obter as seguintes potências de saída: $P_2 = 0,00527\%$, $P_3 = 97,41\%$ e $P_4 = 0,0042\%$.

Para verificar a convergência do algoritmo, foi considerada um número de gerações de 200 para uma

nova simulação e o resultado apresentado de eficiência de transmissão foi muito próximo ao já alcançado com 50 gerações, o valor foi de 97,56%, sendo assim houve um relativo aumento após a nova execução, mas não tão significativo, comprovando que o aumento na quantidade de gerações não alterou muito o valor de saída da eficiência, no caso desse algoritmo. A Figura 5.15 é a representação da evolução da eficiência de transmissão em relação ao número de gerações.

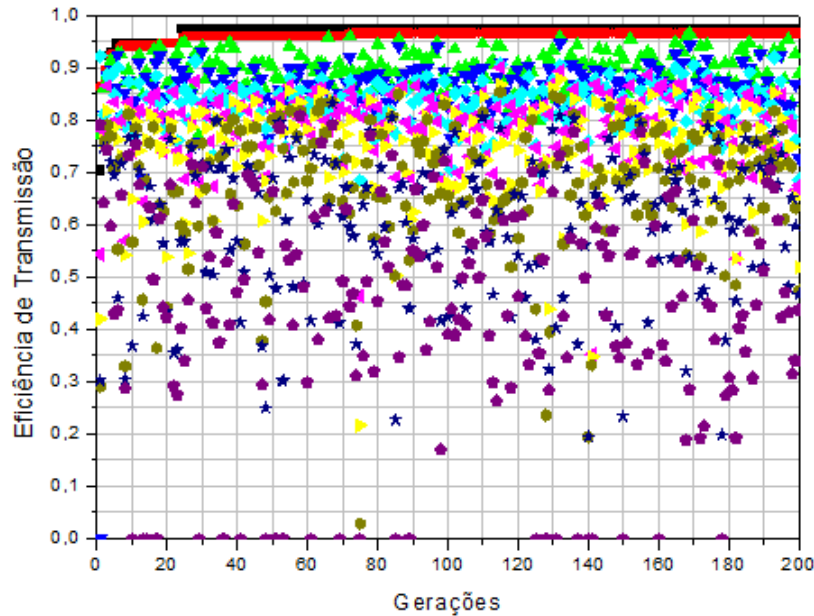


Fig. 5.15: Evolução da eficiência de transmissão para o lobo cinzento, para verificação de convergência.



Fig. 5.16: Geometria do guia de ondas de cruzamento otimizado Ponto 1 ($-2,45 \mu\text{m}$, $0,20 \mu\text{m}$), Ponto 2 ($-1,61 \mu\text{m}$, $0,14 \mu\text{m}$), Ponto 3 ($-0,61 \mu\text{m}$, $0,11 \mu\text{m}$), Ponto 4 ($-0,19 \mu\text{m}$, $0,12 \mu\text{m}$).

Através das técnicas LC adaptada e do MEF foi possível explorar o universo de soluções de guias de ondas cruzadas. Atualizar as posições dos lobos, de acordo com seu desempenho, foi de fundamental importância para obter valores de eficiência de transmissão superiores a 97%, na faixa de comprimento de onda (de 1400 nm a 1600 nm) considerada, pois através aplicação da média ponderada e da avaliação das distâncias entre os melhores e piores lobos é possível alcançar soluções boas mais rapidamente, pois há uma seleção mais cuidadosa nos lobos, que irão permanecer na população. Os parâmetros geométricos da estrutura foram encontrados através do algoritmo de otimização proposto e como consequência foi possível maximizar

a eficiência da estrutura do guia de ondas de cruzamento, eles estão representados na Tabela 5.8.

Tab. 5.8: Parâmetros encontrados com LC

$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$
-2,45	0,20	-1,61	0,14	-0,61	0,11	-0,19	0,12

Na Figura 5.17 é apresentada a distribuição espacial do campo elétrico obtida pelo LC, da melhor solução após a otimização, a eficiência é a transmissão de potência de P_1 a P_3 e na Figura 5.18, a eficiência em função dos comprimentos de onda é apresentada no intervalo de comprimento de onda de $1,4 \mu\text{m}$ e $1,6 \mu\text{m}$. Já na Tabela 5.8 são destacados os parâmetros geométricos encontrados após o processo de otimização e na Figura 5.16 é apresentado o modelo da geometria final obtido, após o processo de otimização.

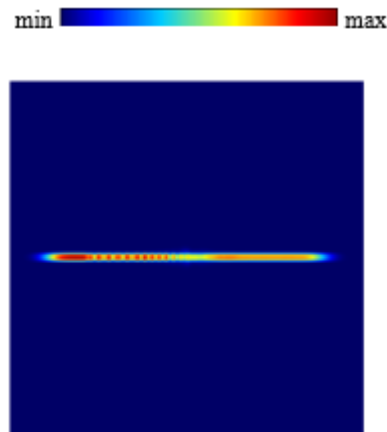


Fig. 5.17: Distribuição do campo obtida após a otimização.

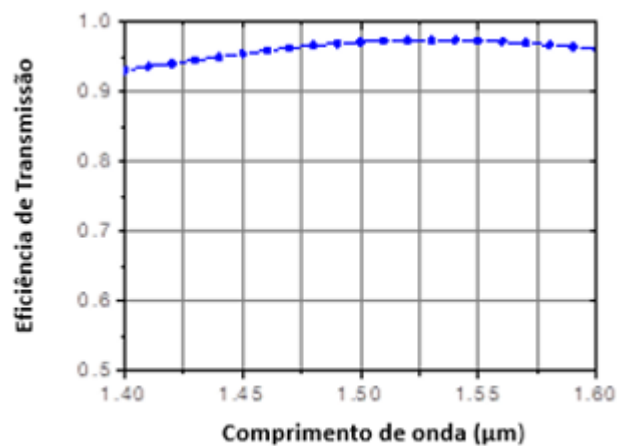


Fig. 5.18: Eficiência de transmissão em função do comprimento de onda.

5.5 Algoritmo híbrido do GRASP juntamente com o RS

O algoritmo híbrido GRASP juntamente com o RS também foi aplicado ao caso da estrutura com cruzamento. Analisando as estruturas é possível verificar que para $\mu=0.34$, foi obtido o valor de 97.58% para eficiência de transmissão e para $\mu=0.51$, o valor de 97.55% e $\mu=0.82$, foi obtida a eficiência de 97.56%. Os parâmetros da Tabela 5.9 encontrados em $\mu=0,34\mu\text{m}$, onde foi resultante o maior valor de eficiência de transmissão.

Tab. 5.9: Parâmetros encontrados em $\mu=0,34\mu\text{m}$

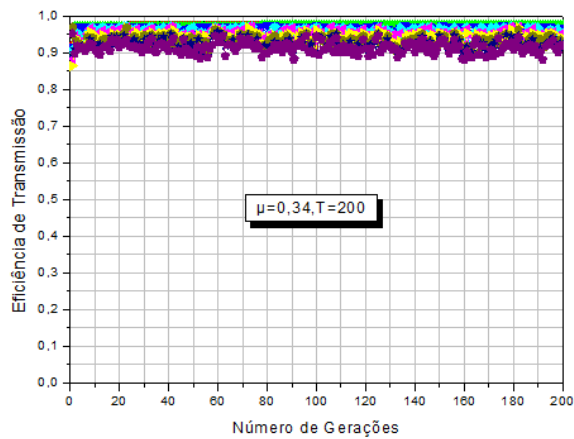
$x_1(\mu\text{m})$	$y_1(\mu\text{m})$	$x_2(\mu\text{m})$	$y_2(\mu\text{m})$	$x_3(\mu\text{m})$	$y_3(\mu\text{m})$	$x_4(\mu\text{m})$	$y_4(\mu\text{m})$
-2,45	0,20	-1,65	0,14	-0,65	0,11	0,19	0,12

As etapas para construção do algoritmo híbrido demandaram mais detalhes uma vez que envolveu a combinação de algoritmos e sendo assim, é possível observar que desde a primeira geração os valores de eficiência já iniciam bem altos, em relação aos outros algoritmos deste trabalho, um dos motivos para tal comportamento é que existem vários filtros realizados antes de finalizar a execução de cada geração, o que evita a geração de valores muito baixos de eficiência. Na Figura 5.19 (a),(b)e(c) é possível observar o comportamento evolutivo de acordo com o número de gerações, para os valores de μ , obtidos no final do processo de otimização.

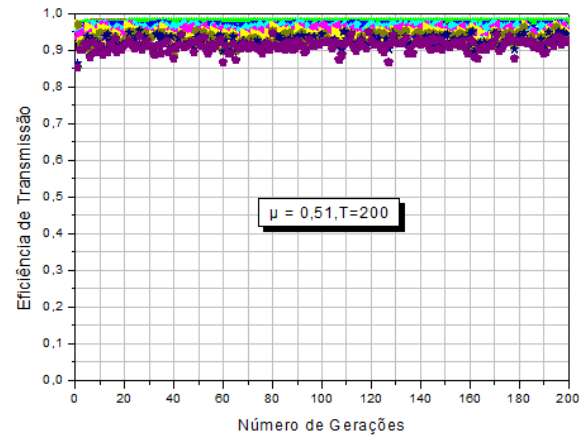
Na Figura 5.20 (a),(b),(c) são apresentadas as distribuições espaciais, de acordo com o μ obtido através do processo de otimização. Pode ser verificado que 97,58% da potência é transmitida. Na Figura 5.21 foi avaliada a eficiência de transmissão no intervalo de comprimento de onda entre 1,50-1,60 μm e pode-se verificar que um maior valor de transferência de potência ocorre em 1,55 μm , assim como esperado.

Ao final de cada execução do algoritmo híbrido GRASP-RS, ou seja ao final de 200 gerações, são geradas 10 soluções, no caso as melhores soluções de todo o processo executado e cada uma dessas soluções foi avaliada em comprimentos de onda de 1,5 até 1,6 μm . Pode-se observar que os valores de eficiência de transmissão associados não são tão próximos, ao comparar todas as soluções, isso é justificado pela questão das geometrias bem diferentes associadas à cada solução, o que pode gerar eficiências bem diferentes. Na Figura 5.22 a relação entre o comprimento de onda e a eficiência de transmissão para cada solução gerada no final do processo de otimização é apresentada.

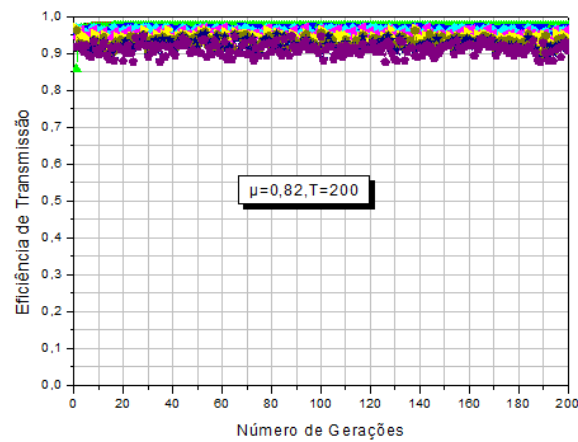
Para verificar a convergência do algoritmo híbrido para o cruzamento de 4 pontos, uma nova execução foi realizada para a estrutura e foi obtida uma eficiência de 96,31%. Na Figura 5.23 está apresentada a relação entre gerações e eficiência de transmissão.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.19: Eficiência de transmissão em função do número de gerações para (a) $\mu=0,34$ (b) $\mu=0,51$ e (c) $\mu=0,82$.

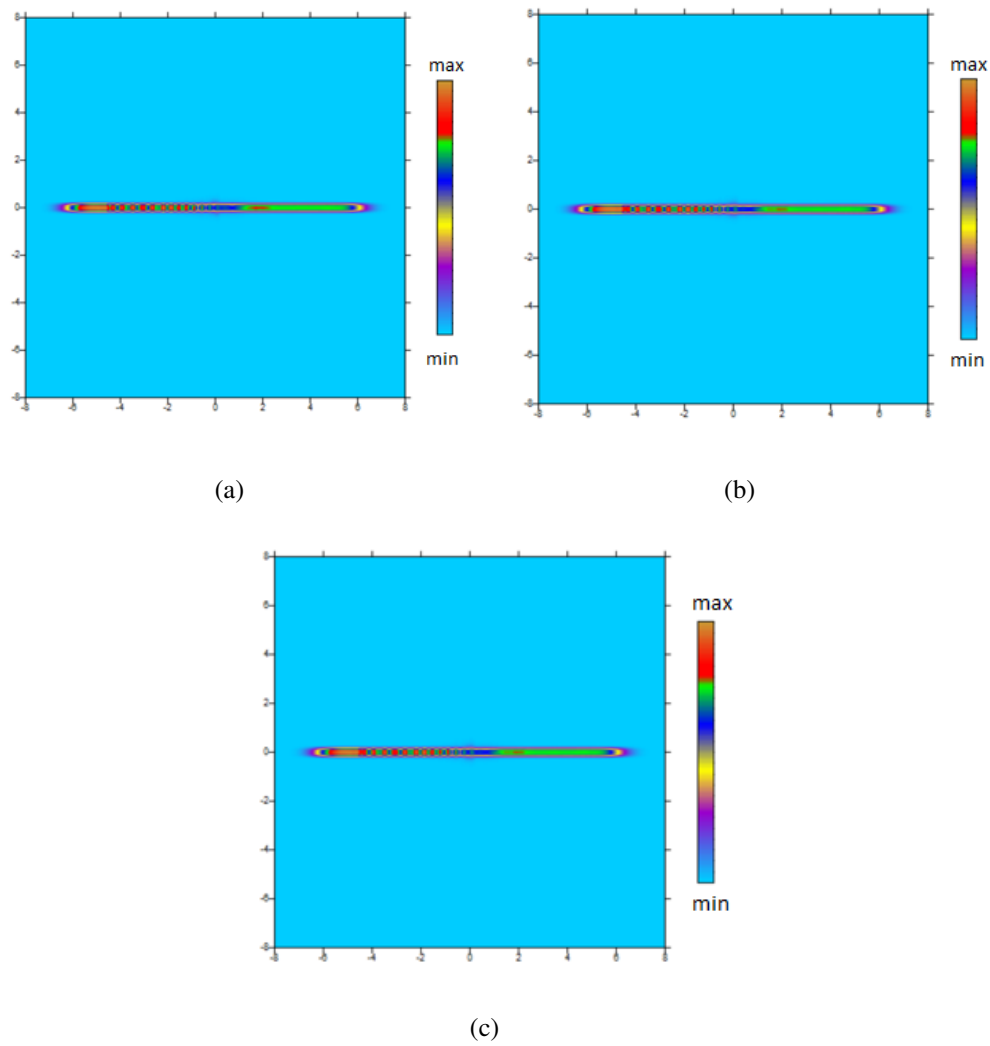


Fig. 5.20: Distribuição espacial do campo elétrico obtida pelo algoritmo híbrido para (a) $\mu=0,34$ (b) $\mu=0,51$ e (c) $\mu=0,82$.

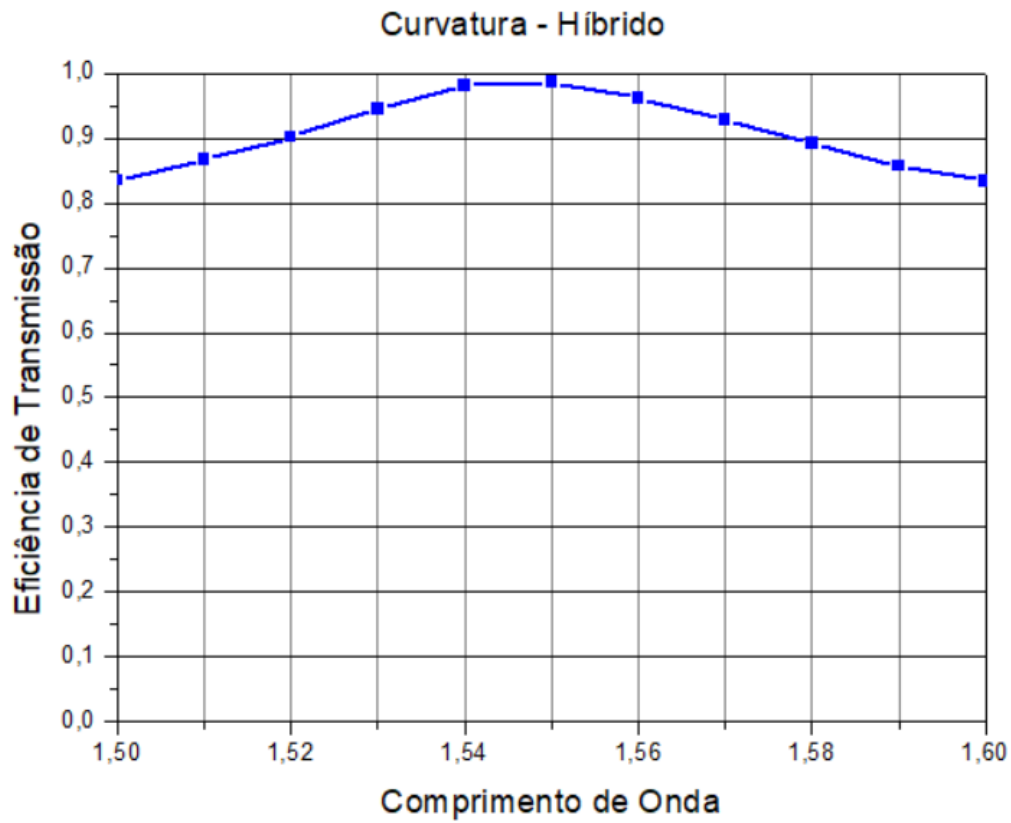


Fig. 5.21: Relação entre comprimentos de onda no intervalo entre 1,5-1,6 μ m e eficiência de transmissão.

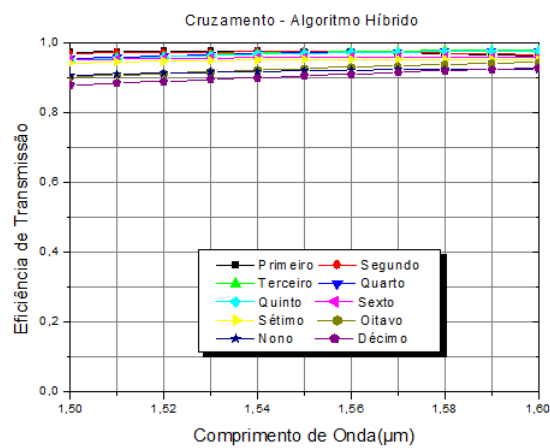


Fig. 5.22: Relação entre comprimentos de onda no intervalo entre 1,5-1,6 μ m e eficiência de transmissão, para cada um dos 10 melhores indivíduos.

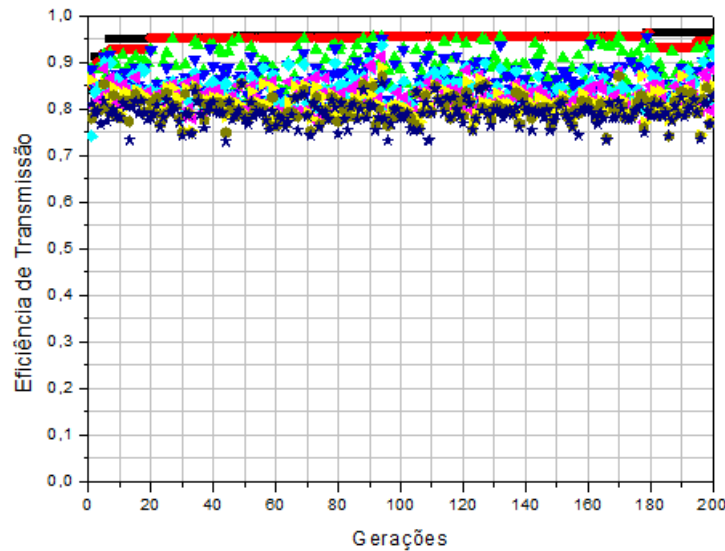


Fig. 5.23: Relação entre número de gerações e eficiência de transmissão para verificação de convergência do algoritmo híbrido.

A Tabela 5.10 representa o resultado obtido por cada algoritmo utilizado e suas respectivas estruturas avaliadas. O algoritmo híbrido (GRASP-RS) apresentou os maiores valores de eficiência de transmissão ao ser comparado com os outros algoritmos utilizados neste trabalho, sendo possível afirmar que uma maior quantidade de filtros, ou seja etapas utilizadas nos algoritmos pode levar a encontrar estruturas com melhores desempenhos, embora seja necessário um maior tempo para executá-los.

Tab. 5.10: Melhores eficiências de transmissão para cada Estrutura e Algoritmo

Estrutura e Algoritmo	Eficiência de Transmissão
Curvatura e AM	98,52%
Curvatura e Híbrido (GRASP-RS)	98,66%
Cruzamento-2-Pontos e PSO	95,76%
Cruzamento-4-Pontos e LC	97,41%
Cruzamento-4-Pontos e Híbrido (GRASP-RS)	97,58%

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou as metaheurísticas AM,PSO,LC, híbrido GRASP-RS adaptadas associadas ao MEF em 2D, como técnicas alternativas para encontrar configurações de estruturas fotônicas, que forneçam valores de eficiência de transmissão satisfatórios.

Foi possível observar que os valores de eficiência de transmissão são dependentes da geometria do arranjo gerado, assim como da disposição dos materiais. É muito importante destacar, a seguinte questão: iniciar com uma solução que apresente uma eficiência de transmissão superior a 50% é algo que ajuda a alcançar melhores resultados, por isso foi muito importante a análise da estrutura base, antes de iniciar o processo de otimização. A técnica de projeto inverso foi essencial para a descoberta de novas estruturas, uma vez que é possível definir previamente uma estrutura base e a partir dela, através da modificação de parâmetros geométricos descobrir outras estruturas com desempenhos superiores. A utilização de poucas variáveis neste trabalho faz com que o espaço de busca seja delimitado, o que torna a fabricação das estruturas mais fácil, uma vez que é menos dispendiosa a busca por parâmetros geométricos.

Este trabalho possibilitou analisar o desempenho de guias de ondas com curvatura de 90° e cruzamentos e constatar que a modificação dos parâmetros geométricos nos cantos da curvatura e na seção cruzada, através dos algoritmos de AM,PSO,LC, híbrido GRASP-RS, são capazes de alterar a eficiência de transmissão. As estratégias conseguiram obter eficiências de transmissão superiores a 95,76%.

Do total de geometrias possíveis a serem testadas para cada estrutura utilizada neste trabalho, foram analisadas em média de 500 a 2000 configurações, caso não fossem usadas as metaheurísticas implementadas, o tempo para geração de soluções viáveis tornaria impraticável a aplicação, por exemplo de um método de tentativa e erro. Todas as possibilidades de soluções viáveis não são testadas, pois computacionalmente seria muito caro, mas trazem resultados satisfatórios.

Todos os algoritmos aplicados neste trabalho possuem uma dependência grande de processos estocásticos, por isso os passos adotados devem seguir sempre as restrições estabelecidas pelo espaço de busca da estrutura, para evitar ao máximo intervalos indesejados e principalmente buscar critérios de avaliação e seleção de potenciais soluções, a fim de melhorar as soluções já existentes.

A construção de um algoritmo híbrido permitiu filtrar as soluções de uma forma mais efetiva desde o

início do processo iterativo, o que gerou desde o início do processo de otimização valores de eficiência satisfatórios, considerando o padrão dos algoritmos apenas aplicado sozinhos. Com o algoritmo híbrido, foi possível adotar uma quantidade de passos maior, para finalizar cada geração, o que trouxe soluções melhores desde o início do processo.

Para trabalhos futuros são propostas melhorias como a implementação de outras metaheurísticas, a variação de outros parâmetros geométricos das estruturas analisadas, como a largura do guia de ondas, uma mudança no número de pontos variados nos cantos da curvatura, assim como projetos de cruzamentos com mais guias 3×3 , 4×4 , por exemplo, outros formatos de curvaturas, tais como Z, S, redução de tamanhos, mudanças nas formas, alturas, segmentação dos cruzamentos e curvaturas para melhorar as formas já otimizadas, alteração da largura dos guias de ondas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S.K. Selvaraja and P. Sethi. Review on optical waveguides. 2018.
- [2] N. Zamhari and A.A. Ehsan. Large cross-section rib silicon-on-insulator (soi) s-bend waveguide. *Optik*, 130:1414–1420, 2017.
- [3] S. Wu, X. Mu, L. Cheng, S. Mao, and H.Y. Fu. State-of-the-art and perspectives on silicon waveguide crossings: A review. *Micromachines*, 11(3), 2020.
- [4] Z. Lu, J. Jhoja, J. Klein, X. Wang, A. Liu, J. Flueckiger, J. Pond, and L. Chrostowski. Performance prediction for silicon photonics integrated circuits with layout-dependent correlated manufacturing variability. *Opt. Express*, 25(9):9712–9733, May 2017.
- [5] S. Logan, D. Vercruysse, J. Skarda, N. V. Sapra, J. A. Petykiewicz, and J. Vučković. Nanophotonic inverse design with spins: Software architecture and practical considerations. *Applied Physics Reviews*, 7(1):011407, 2020.
- [6] J. Lu and J. Vučković. Nanophotonic computational design. *Opt. Express*, 21(11):13351–13367, Jun 2013.
- [7] L. Su, A. Y. Piggott, N. V. Sapra, J. Petykiewicz, and J. Vučković. Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer. *ACS Photonics*, 5(2):301–305, 2018.
- [8] M. L. K. Christopher, S. Bhargava, D. M. Owen, and E. Yablonovitch. Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design. *Opt. Express*, 21(18):21693–21701, Sep 2013.
- [9] A.Y. Piggott, J. Lu, T.M. Babinec, K.G. Lagoudakis, J. Petykiewicz, and J. Vučković. Inverse design and implementation of a wavelength demultiplexing grating coupler. In *CLEO: 2015*, page SM3I.2. Optica Publishing Group, 2015.
- [10] B. Shen, P. Wang, R. Polson, and R. Menon. An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with footprint. *Nature Photonics*, 9:378–382, May 2015.
- [11] L.F. Frellsen, D. Yunhong, O. Sigmund, and L.H. Frandsen. Topology optimized mode multiplexing in silicon-on-insulator photonic wire waveguides. *Opt. Express*, 24(15):16866–16873, Jul 2016.

- [12] S. Molesky, Z. Lin, A. Y. Piggott, W. Jin, J. Vučković, and A. W. Rodriguez. Inverse design in nanophotonics. *Nature Photonics*, 12(11):659–670, nov 2018.
- [13] T. Hoekman. *Optimization of nanoscale waveguide taper and bend geometries, tese submetida ao McGill University*. PhD thesis, Montreal CA, 2018.
- [14] K. Yao, R. Unni, and Y. Zheng. Intelligent nanophotonics: merging photonics and artificial intelligence at the nanoscale. *Nanophotonics*, 8(3):339–366, 2019.
- [15] C. Manolatou, S.G. Johnson, S. Fan, P.R. Villeneuve, H.A. Haus, and J.D. Joannopoulos. High-density integrated optics. *Journal of Lightwave Technology*, 17(9):1682–1692, 1999.
- [16] M. Khanzadeh, M. Malekshahi, and A. Rahmati. Optimization of loss in orthogonal bend waveguide: Genetic algorithm simulation. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3):525–530, 2013.
- [17] M. Popovic, K. Wada, S. Akiyama, H.A. Haus, and J. Michel. Air trenches for sharp silica waveguide bends. *J. Lightwave Technol.*, 20(9):1762–1772, Sep 2002.
- [18] J.J. Su and W.S. Wang. Novel coherently coupled multisectional bending optical waveguide. *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(8):1112–1114, 2002.
- [19] A. M. Shajakhan and S. Aditya. Slope-matched s-bends for inclined integrated-optic waveguides. *Microwave and Optical Technology Letters*, 24(4):267–271, 2000.
- [20] K. Rauscher, D. Erni, J. Smajic, and C. Hafner. Improved transmission for 60 ° photonic crystal waveguide bends. *Progress in electromagnetic research symposium*, 2004.
- [21] Y. Tsuji, Nomura T. Hirayama, K., K. Sato, and S. Nishiwaki. Design of optical circuit devices based on topology optimization. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(7):850–852, 2006.
- [22] Y. Tsuji and K. Hirayama. Design of optical circuit devices using topology optimization method with function-expansion- based refractive index distribution. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20(12):982–984, 2008.
- [23] M. Djavid, F. Monifi, A. Ghaffari, and M. Abrishamian. A new broadband l-shaped bend based on photonic crystal ring resonators. pages 24–28, 03 2008.
- [24] Z. Z. Chang, L. Y Zhao, and L.Z. Yuan. Waveguide bend of 90° in two-dimensional triangular lattice silicon photonic crystal slabs. *Chinese Physics Letters*, 27(8):084203, aug 2010.
- [25] X. Y. Yu, Y.H. Xiang, and Fan L.S. Optimization of s-shaped bend waveguide using random orthogonal axial gradient method. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Industrial Informatics*, pages 59–63. Atlantis Press, 2015/10.

- [26] J. Yuan, Yang J., D. Shi, W. Ai, and T. Shuai. Design optimization of a low-loss and wide-band sharp 120° waveguide bend in 2d photonic crystals. *Optics Communications*, 367:356–363, 2016.
- [27] M. Koshiba. *Optical Waveguide Theory by the Finite Element Method*. 1992.
- [28] Y.D. Sergeyev, D.E. Kvasov, and M.S. Mukhametzhanov. On the efficiency of nature-inspired metaheuristics in expensive global optimization with limited budget. *Scientific Reports*, 8, 01 2018.
- [29] J. Nocedal and S. Wright. *Numerical Optimization*. 2006.
- [30] C. Valenzuela, B. Crawford, R. Soto, E. Monfroy, and F. Paredes. A 2-level metaheuristic for the set covering problem. *International Journal of Computers, Communications e Control (IJCCC)*, 7:377–387, 06 2012.
- [31] E. Talbi. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. 2009.
- [32] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, and M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680, 1983.
- [33] Y. Elesin, B.S. Lazarov, J.S. Jensen, and O. Sigmund. Time domain topology optimization of 3d nanophotonic devices. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 12(1):23–33, 2014.
- [34] J.S. Jensen and O. Sigmund. Topology optimization for nano-photonics. *Laser & Photonics Reviews*, 5(2):308–321, 2011.
- [35] J. S. Jensen and O. Sigmund. Systematic design of photonic crystal structures using topology optimization: Low-loss waveguide bends. *Applied Physics Letters*, 84(12):2022–2024, 2004.
- [36] K. Morimoto, A. Iguchi, and Y. Tsuji. Efficient topology optimization of optical waveguide using finite element method based on slowly varying envelope approximation. *Optik*, 226:165951, 2021.
- [37] F. Firdausi, A. Djunaidy, and A. Mukhlason. Optimization of city bus routes in surabaya using memetic algorithm as a solution to solve orienteering problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1500:012091, Apr 2020.
- [38] F. G. Guimaraes. *Local Learning and Search in Memetic Algorithms for Computer Aided Design, thesis submitted to Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais*. PhD thesis, 2008.
- [39] D. Chen, L. Wang, Y. Zhang, X. Hu, X. Xiao, and S. Yu. Ultralow crosstalk and loss cmos compatible silicon waveguide star-crossings with arbitrary included angles. *ACS Photonics*, 5, 09 2018.
- [40] S. K. Selvaraja and P. Sethi. *Review on Optical Waveguides*. Aug 2018.
- [41] Y. Shi, W. Li, A. Raman, and S. Fan. Optimization of multilayer optical films with a memetic algorithm and mixed integer programming. *ACS Photonics*, 5(3):684–691, 2018.

- [42] C. Forestiere, M. Donelli, G.F. Walsh, E. Zeni, G. Miano, and L.D. Negro. Particle-swarm optimization of broadband nanoplasmonic arrays. *Opt. Lett.*, 35(2):133–135, Jan 2010.
- [43] J.S. Wang and S.X. Li. An improved grey wolf optimizer based on differential evolution and elimination mechanism. *Scientific Reports*, 9(7181), May 2019.
- [44] P. Festa and M. Resende. An annotated bibliography of grasp – part i: algorithms. *International Transactions in Operational Research*, 16:1 – 24, Jan 2009.
- [45] F. Busetti. *Simulated annealing overview*. May 2001.
- [46] Z. Li, G. Li, J. Huang, Z. Zhang, J. Yang, C. Yang, Y. Qian, W. Xu, and H. Huang. Ultra-compact high efficiency and low crosstalk optical interconnection structures based on inverse designed nanophotonic elements. *Scientific Reports*, 10:11993, Jul 2020.
- [47] M. Wiering. Memory-based memetic algorithms. *Proceedings of the Thirteenth Belgian-Dutch Conference on Machine Learning*, page 191–198, 2004.
- [48] D. Freitas, L. G. Lopes, and F.M. Dias. Particle swarm optimisation: A historical review up to the current developments. *Entropy*, 22(3), 2020.
- [49] M. Gashti and H. Javanshir. Greedy randomized adaptive search procedures for a single product network design model. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 6, Jan 2011.
- [50] H.L. Han, H. Li, X.P. Zhang, A. Liu, T.Y. Lin, Z. Chen, H.B. Lv, M.H. Lu, X.P. Liu, and Y.F. Chen. High performance ultra-compact soi waveguide crossing. *Opt. Express*, 26(20):25602–25610, Oct 2018.
- [51] E. A. J. Marcatili. Bends in optical dielectric guides. *The Bell System Technical Journal*, 48(7):2103–2132, 1969.
- [52] Z. Hu and Y.Y. Lu. Computing optimal waveguide bends with constant width. *J. Lightwave Technol.*, 25(10):3161–3167, Oct 2007.
- [53] C. Vassallo. *Optical Waveguide Concepts*. Amsterdam, 1991.
- [54] H. H. Deng, D.O. Yevick, and S.K. Chaudhuri. Bending characteristics of asymmetric soi polarization rotators. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10):2113–2115, 2005.
- [55] E.G. Neumann. Reducing radiation loss of tilts in dielectric optical waveguides. *Electronics Letters*, 17:369–371(2), May 1981.
- [56] R. J. Ram. Cmos photonic integrated circuits. In *OFC/NFOEC*, pages 4–8, 2012.

- [57] R. Soref. The past, present, and future of silicon photonics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(6):1678–1687, 2006.
- [58] V. Stojanović, R.J. Ram, M. Popović, S. Lin, S. Moazeni, M. Wade, C. Sun, L. Alloatti, A. Atabaki, F. Pavanello, N. Mehta, and P. Bhargava. Monolithic silicon-photonics platforms in state-of-the-art cmos soi processes. *Opt. Express*, 26(10):13106–13121, May 2018.
- [59] Y. Li, C. Xu, C. Zeng, W. Wang, J. Yang, H. Yu, and X. Jiang. Hybrid plasmonic waveguide crossing based on the multimode interference effect. *Optics Communications*, 335:86–89, 2015.
- [60] P. Sanchis, P. Villalba, F. Cuesta, A. Håkansson, A. Griol, J.V. Galán, A. Brimont, and J. Martí. Highly efficient crossing structure for silicon-on-insulator waveguides. *Opt. Lett.*, 34(18):2760–2762, Sep 2009.
- [61] M. Danaie and A. Geravand. Design of low-cross-talk metal–insulator–metal plasmonic waveguide intersections based on proposed cross-shaped resonators. *Journal of Nanophotonics*, 12(4):1–20, 2018.
- [62] M. Johnson, M. G. Thompson, and D. Sahin. Low-loss, low-crosstalk waveguide crossing for scalable integrated silicon photonics applications. *Opt. Express*, 28(9):12498–12507, Apr 2020.
- [63] W. Mai, L. Cui, and L. Yu. Multimode-interference-based crossing for metal-insulator-metal waveguides. *Chin. Opt. Lett.*, 15(3):032301, Mar 2017.
- [64] Z. Yu, A. Feng, X. Xi, and X. Sun. Inverse-designed low-loss and wideband polarization-insensitive silicon waveguide crossing. *Opt. Lett.*, 44(1):77–80, Jan 2019.
- [65] G.B. Hoffman, C. Dallo, A. Starbuck, D. Hood, A. Pomerene, D. Trotter, and C. T. DeRose. Improved broadband performance of an adjoint shape optimized waveguide crossing using a levenberg-marquardt update. *Opt. Express*, 27(17):24765–24780, Aug 2019.
- [66] L. Su, A. Piggott, N. Sapra, J. Petykiewicz, and J. Vuckovic. Inverse design and demonstration of a compact on-chip narrowband three-channel wavelength demultiplexer. *ACS Photonics*, 5, Aug 2017.
- [67] N. V. Sapra, D. Vercruysse, L. Su, K. Y. Yang, J. Skarda, A. Y. Piggott, and J. Vučković. Inverse design and demonstration of broadband grating couplers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(3):1–7, 2019.
- [68] A. Vaish and H. Parthasarathy. Analysis of a rectangular waveguide using finite element method. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2:117–125, Jan 2008.
- [69] S. Selleri, L. Vincetti, A. Cucinotta, and M. Zoboli. Complex fem modal solver of optical waveguides with pml boundary conditions. *Optical and Quantum Electronics*, 33:359–371, 2001.

- [70] T. Shiina, K. Shiraishi, and S. Kawakami. Waveguide-bend configuration with low-loss characteristics. *Opt. Lett.*, 11(11):736–738, Nov 1986.
- [71] F. Sun and S. He. Waveguide bends by optical surface transformations and optic-null media. *J. Opt. Soc. Am. B*, 35(4):944–949, Apr 2018.
- [72] S. Fan, S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos, C. Manolatou, and H.A. Haus. Waveguide branches in photonic crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 18(2):162–165, Feb 2001.
- [73] M. Hochberg and T.B. Jones. Towards fabless silicon photonics. volume 4, pages 492–494, Aug 2010.
- [74] D. C. Tee, N. Tamchek, M. H. A. Bakar, and F. R.M. Adikan. High-transmission-efficiency 120° photonic crystal waveguide bend by using flexible structural defects. *IEEE Photonics Journal*, 6(4):1–10, 2014.
- [75] E. Degirmenci, F. Surre, S. Philippe, R. M. Basilio, and P. Landais. Improved bend waveguide design for terahertz transmission. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2(1):137–143, 2012.
- [76] M. Cherchi, S. Ylinen, M. Harjanne, M. Kapulainen, and T. Aalto. Dramatic size reduction of waveguide bends on a micron-scale silicon photonic platform. *Opt. Express*, 21(15):17814–17823, Jul 2013.
- [77] Y.A. Vlasov and S.J. McNab. Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends. *Opt. Express*, 12(8):1622–1631, Apr 2004.
- [78] S. Musa, A. Borreman, A. A. M. Kok, M.B.J. Diemeer, and A. Driessen. Experimental study of bent multimode optical waveguides. *Appl. Opt.*, 43(30):5705–5707, Oct 2004.
- [79] E. Dulkeith, F. Xia, L. Schares, W.M.J. Green, and Y.A. Vlasov. Group index and group velocity dispersion in silicon-on-insulator photonic wires. *Opt. Express*, 14(9):3853–3863, May 2006.
- [80] X. Jiang, H. Wu, and D. Dai. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon. *Opt. Express*, 26(13):17680–17689, Jun 2018.
- [81] F. Vogelbacher, S. Nevlacsil, M. Sagmeister, J. Kraft, K. Unterrainer, and R. Hainberger. Analysis of silicon nitride partial euler waveguide bends. *Opt. Express*, 27(22):31394–31406, Oct 2019.
- [82] Y. Wang and D. Dai. Multimode silicon photonic waveguide corner-bend. *Opt. Express*, 28(7):9062–9071, Mar 2020.
- [83] C.E. Rubio-Mercedes, V.F. Rodríguez-Esquerre, I. Lima Jr, and H. E. Hernández Figueroa. Analysis of the propagation properties of 90° -bend periodic segmented waveguides using the 2d finite element

- method. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 17:32–43, Mar 2018.
- [84] Y. Ma, Y. Zhang, S. Yang, A. Novack, R. Ding, A.E.J. Lim, G.Q. Lo, B. T. Jones, and M. Hochberg. Ultralow loss single layer submicron silicon waveguide crossing for soi optical interconnect. *Opt. Express*, 21(24):29374–29382, Dec 2013.
- [85] J.W. Silverstone, D. Bonneau, K. Ohira, N. Suzuki, H. Yoshida, N. Iizuka, M. Ezaki, C.M. Natarajan, M.G. Tanner, R.H. Hadfield, V. Zwiller, G.D. Marshall, J.G. Rarity, J.L. O'Brien, and M.G. Thompson. On-chip quantum interference between silicon photon-pair sources. *Nature Photonics*, 8(2):104–108, dec 2013.
- [86] F. Callewaert and K. Aydin. Inverse-designed all-dielectric waveguide bend. In Arthur J. Davis, Cornelius F. Hahlweg, and Joseph R. Mulley, editors, *Novel Optical Systems Design and Optimization XIX*, volume 9948, pages 62–69. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.
- [87] G.P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*, volume 4th Edition. John Wiley & Sons, Chichester, 2010.
- [88] D.X. Dai and J.E. Bowers. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for peta-bit optical interconnects. *Nanophotonics*, 3(4-5):283–311, 2014.
- [89] J. Wang, J.Y. Yang, I.M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A.E. Willner. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nature Photonics*, 6:488–496, 2012.
- [90] Y. Liu, J.M. Shainline, X. Zeng, and M.A. Popović. Ultra-low-loss cmos-compatible waveguide crossing arrays based on multimode bloch waves and imaginary coupling. *Opt. Lett.*, 39(2):335–338, Jan 2014.
- [91] Y. Nagasaki, M. Miyata, M. Higuchi, and J. Takahara. Surface plasmon propagation on overcrossing metallic waveguides fabricated by a pick-and-place method. *MRS Communications*, 5:587–591, 12 2015.
- [92] H. Xu and Y. Shi. Dual-mode waveguide crossing utilizing taper-assisted multimode-interference couplers. *Opt. Lett.*, 41(22):5381–5384, Nov 2016.
- [93] B. Wu, Y. Yu, and X. Zhang. Multimode waveguide crossing with ultralow loss and low imbalance. *Opt. Express*, 28(10):14705–14711, May 2020.
- [94] Y. Xu, J. Huang, L. Yang, H. Ma, Y. Huan, T. Xie, J. Yang, and Z. Zhang. Inverse-designed ultra-compact high efficiency and low crosstalk optical interconnect based on waveguide crossing and wavelength demultiplexer. *Scientific Reports*, 11:12842, Jun 2021.

- [95] Y. Zhang, A. Hosseini, X. Xu, D. Kwong, and R.T. Chen. Ultralow-loss silicon waveguide crossing using bloch modes in index-engineered cascaded multimode-interference couplers. *Opt. Lett.*, 38(18):3608–3611, Sep 2013.
- [96] C. Blum and A. Roli. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, 35:268–308, Jan 2003.
- [97] C.R. Reeves. Modern heuristic techniques for combinatorial problems. 1993.
- [98] D.C. Sawyer, D. Sell, P. J. Ronald, E.B. Whiting, J.A. Fan, and D.H. Werner. Review of numerical optimization techniques for meta-device design. *Opt. Mater. Express*, 9(4):1842–1863, Apr 2019.
- [99] G.N.M Silveira, V.F.R Esquerre, and H. E. H. Figueroa. Strategy of search and refinement by ga in 2-d photonic crystals with absolute pbg. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 47(4):431–438, 2011.
- [100] R.E. Precup, D.R. Codrut, and E. M. Petriu. Grey wolf optimizer algorithm-based tuning of fuzzy control systems with reduced parametric sensitivity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1):527–534, 2017.
- [101] R.M. Aiex, M.G.C. Resende, P.M. Pardalos, and G. Toraldo. Grasp with path relinking for three-index assignment. *INFORMS Journal on Computing*, 17:224–247, May 2005.
- [102] D. S. Johnson, C. R. Aragon, L. A. McGeoch, and C. Schevon. Optimization by simulated annealing: An experimental evaluation; part i, graph partitioning. *Operations Research*, 37(6):865–892, 1989.
- [103] P. Festa and M. G. C. Resende. *GRASP.Handbook of Heuristics*. 2016.
- [104] M. Garey and D. Johnson. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. New York, 1979.
- [105] B. Chen and G. Quan. Np-hard problems of learning from examples. In *2008 Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, volume 2, pages 182–186, 2008.
- [106] M.H.J. Romanycia and F. J. Pelletier. What is a heuristic? *Computational Intelligence*, 1:47 – 58, Jan 1985.
- [107] O. Ibrahim and G. Laporte. Metaheuristics: A bibliography. *Annals of Operational Research*, 63:513–628, Oct 1996.
- [108] T. Stützle. Local search algorithms for combinatorial problems - analysis, improvements, and new applications. In *DISKI*, 1999.
- [109] T.A. Feo and M. G. C. Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6:109–133, Mar 1995.

-
- [110] L.N. de Castro. *Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications*. 1st ed. edition, 2006.
- [111] C.E. Rubio Mercedes. *Análise de Estruturas Fotônicas por Elementos Finitos no Domínio da Frequência*. PhD thesis, Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- [112] R. D. Cook, D. S. Malkus, and M. E. Plesha. *Concepts and applications of finite element analysis*. 1989.
- [113] L. A. M. Antoniacomi and S. I. S. Souza. A técnica dos múltiplos domínios aplicada à geração de malhas no software ansys cfx-mesh. 2010.
- [114] I. Erhunmwun and U. Ikponmwosa. Review on finite element method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 21:999, Nov 2017.
- [115] P. Moscato and C. Cotta. An introduction to memetic algorithms. *Inteligencia Artificial, revista Iberoamericana De Inteligencia Artificial - AEPIA*, 7, Jul 2003.
- [116] P. Garg. A comparison between memetic algorithm and genetic algorithm for the cryptanalysis of simplified data encryption standard algorithm. *International Journal of Network Security & Its Applications*, 1:34–42, Apr 2009.
- [117] C. Cotta, L. Mathieson, and P. Moscato. *Memetic Algorithms*. 2016.
- [118] Li W. Raman A. e Fan S. Shi, Y. Memetic algorithm optimization of thin-film photonic structures for thermal and energy applications. In *2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, pages 1–2, 2018.
- [119] P. Moscato and C. Cotta. *A Gentle Introduction to Memetic Algorithms*, volume 57, pages 105–144. Jan 2003.
- [120] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, volume 4, pages 1942–1948, 1995.
- [121] S. Sengupta, S. Basak, and R. A. Peters. Particle swarm optimization: A survey of historical and recent developments with hybridization perspectives. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1(1):157–191, 2019.
- [122] C.W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 4:25–34, 1987.
- [123] F. Heppner and U. Grenander. *A Stochastic Nonlinear Model for Coordinate Bird Flocks*. Jan 1990.

- [124] M. Cai, X. Zhang, G. Tian, and J. Liu. Particle swarm optimization system algorithm. In D. S. Huang, L. Heutte, and M. Loog, editors, *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Contemporary Intelligent Computing Techniques*, pages 388–395, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer Berlin Heidelberg.
- [125] A.P. Engelbrecht. *Computational intelligence : an introduction*, volume 2th Edition. 2007.
- [126] E. Emary, W. Yamany, A. E. Hassanien, and V. Snasel. Multi-objective gray-wolf optimization for attribute reduction. volume 65, pages 623–632, Apr 2015.
- [127] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, and A. Lewis. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69:46–61, 2014.
- [128] Y. Li, X. Lin, and J. Liu. An improved gray wolf optimization algorithm to solve engineering problems. *Sustainability*, 13:3208, Mar 2021.
- [129] H. Faris, I. Aljarah, M. A. Al-Betar, and S. Mirjalili. Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications. *Neural Computing and Applications*, 30(2):413–435, 2017.
- [130] J.P.M. Silva and K.A. Sakallah. Grasp-a new search algorithm for satisfiability. In *Proceedings of International Conference on Computer Aided Design*, pages 220–227, 1996.
- [131] T. L. Friesz, H.J. Cho, N. J. Mehta, R. L. Tobin, and G. Anandalingam. A simulated annealing approach to the network design problem with variational inequality constraints. *Transportation Science*, 26(1):18–26, 1992.
- [132] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, and E. Teller. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 21:1087–1092, 1953.