

**Universidade Federal do Vale do São Francisco**  
**Curso de Graduação em Engenharia da Computação**

Delmiro Daladier Sampaio Neto

## **Otimização de Dispositivos Ópticos Utilizando Algoritmos Bioinspirados**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Vale do São Francisco –  
UNIVASF, Campus Juazeiro–BA, como Requisito  
Parcial para obtenção do título de Engenheiro da  
Computação.

Orientador: Ana Júlia Oliveira Barros

Juazeiro - BA  
2015

**Universidade Federal do Vale do São Francisco**  
**Curso de Graduação em Engenharia da Computação**

**Folha de Aprovação**

Delmiro Daladier Sampaio Neto

**Otimização de Dispositivos Ópticos Utilizando Algoritmos  
Bioinspirados**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF.

---

**Dra. Ana Júlia R. F. de Oliveira Barros,**  
**Doutora, Universidade Federal do Vale**  
**do São Francisco**

---

**Msc.Fábio Nelson de Souza Pereira**

---

**Dr. Max Santana Rolemberg Farias**

Aprovado pelo Colegiado de Engenharia da Computação em:  
26/04/2017

# DEDICATORIA

*Aos meus pais. ...*

# Agradecimentos

Agradeço aos meu pais por toda paciência e suporte ao longo desses anos.

*"It's gonna be legen — wait for it — dary! - Barney Stinson*

# Resumo

As telecomunicações atravessam uma fase de franca expansão. Os sistemas de comunicação baseados em sinais puramente elétricos acabam por não conseguirem atender as demandas de velocidade e qualidade de transmissão impostas, devido às limitações físicas inerentes aos materiais que compõem esses sistemas. Os sistemas de comunicação ópticos surgem como uma alternativa eficaz para as limitações e problemas de transmissão. Sendo assim, este trabalho contextualiza o crescimento das telecomunicações, principalmente a óptica, e a necessidade de tornar mais eficiente os mecanismos de manipulação e transporte da luz, otimizando-os. Inicialmente é feita uma introdução sobre telecomunicação e seus conceitos, que possibilitam uma melhor compreensão das vantagens da comunicação óptica. Seguindo, é realizado um estudo sobre guias de ondas segmentados e suas vantagens no transporte e confinamento de sinais ópticos. Também neste trabalho, é realizada uma introdução aos algoritmos que realizam otimização por enxame de partículas, seus conceitos básicos e suas aplicações, estes serão aplicados aos guias de ondas para melhorar a eficiência no acoplamento óptico. Neste sentido, este trabalho destina-se a desenvolver uma metodologia para o projeto e análise de acopladores ópticos com perdas reduzidas. Para isso serão utilizadas as plataformas Matlab e Comsol Multiphysics.

**Palavras-Chave:** Fotônica, Guias de Ondas Ópticos, Computação Evolutiva, Otimização, Enxame de Partículas.

# ABSTRACT

Telecommunications are in a phase of expansion. Communication systems based on purely electrical signals end up failing to meet the demands of speed and transmission quality imposed due to the physical limitations of the materials that compose make up these systems. The optical communication systems emerged as an effective alternative to the limitations and transmission problems. Thus, this study contextualizes the growth of telecommunications, especially optics, and the requirement to provide more efficient mechanisms for handling and transport of light, optimizing them. Initially an introduction of telecommunication concepts is developed, enabling a better understanding of the advantages of optical communication. After this, a study on waveguides and its advantages in transportation and confinement of optical signals is made. Following the work is made an explanation about algorithms that perform optimization using particle swarm, its concepts and its applications, these will be applied to waveguides to improve efficiency in optical coupling. Thus, this work aims to develop a methodology for the design and analysis of optocouplers with reduced losses. For it will be used the Matlab and Comsol Multiphysics platforms

**Keywords: Photonics, Optical Waveguides, Evolutionary Computing, Optimization, Particle Swarm.**

# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Modelo de Sistema de Comunicação. . . . .                         | 15 |
| Figura 2 – Modulação ASK . . . . .   | 16 |
| Figura 3 – Modulação FSK . . . . .   | 17 |
| Figura 4 – Modulação PSK . . . . .   | 17 |
| Figura 5 – Conceito do experimento de Tyndall . . . . .                      | 18 |
| Figura 6 – Reflexão Total Interna em Uma Fibra Óptica . . . . .              | 19 |
| Figura 7 – Guia de Onda . . . . .  | 20 |
| Figura 8 – Guia de Onda Segmentado . . . . .                                 | 21 |
| Figura 9 – Divisão em Elementos Finitos . . . . .                            | 22 |
| Figura 10 – Algoritmos Bioinspirados . . . . .                               | 24 |
| Figura 11 – Enxame de Partículas . . . . .                                   | 25 |
| Figura 12 – Atualização da Velocidade da Partícula . . . . .                 | 26 |
| Figura 13 – Convergência do Algoritmo PSO . . . . .                          | 27 |
| Figura 14 – Modelo de Dispositivo Óptico Desenvolvido com o Comsol . . . . . | 28 |



# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação entre métodos de otimização . . . . . | 24 |
| Tabela 2 – Fluxo de trabalho do projeto . . . . .           | 29 |

## Lista de quadros

# Sumário

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
|            | <b>Lista de ilustrações . . . . .</b>                      | <b>8</b>  |
|            | <b>Lista de tabelas . . . . .</b>                          | <b>9</b>  |
|            | <b>Lista de quadros . . . . .</b>                          | <b>10</b> |
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                                | <b>12</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa . . . . .</b>                             | <b>13</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos . . . . .</b>                                 | <b>14</b> |
| 1.2.1      | Objetivo Geral . . . . .                                   | 14        |
| 1.2.2      | Objetivos Específicos . . . . .                            | 14        |
| <b>1.3</b> | <b>Organização do Trabalho . . . . .</b>                   | <b>14</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA . . . . .</b>                     | <b>15</b> |
| <b>2.1</b> | <b><i>Telecomunicações</i> . . . . .</b>                   | <b>15</b> |
| 2.1.1      | <i>Perdas</i> . . . . .                                    | 15        |
| 2.1.2      | <i>Lagura de Banda</i> . . . . .                           | 17        |
| <b>2.2</b> | <b><i>Histórico das Comunicações Ópticas</i> . . . . .</b> | <b>18</b> |
| <b>2.3</b> | <b><i>Guias de Ondas</i> . . . . .</b>                     | <b>19</b> |
| 2.3.1      | <i>Simulação</i> . . . . .                                 | 21        |
| <b>2.4</b> | <b><i>Otimização</i> . . . . .</b>                         | <b>22</b> |
| <b>2.5</b> | <b><i>Algoritmos Bio-Inspirados</i> . . . . .</b>          | <b>23</b> |
| 2.5.1      | <i>Particle Swarm Optimization - PSO</i> . . . . .         | 24        |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>                       | <b>28</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Comsol Multiphysics . . . . .</b>                       | <b>28</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Matlab . . . . .</b>                                    | <b>29</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Cronograma de Trabalho . . . . .</b>                    | <b>29</b> |
|            | <b>Considerações Finais . . . . .</b>                      | <b>30</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                               | <b>31</b> |
|            | <b>Apêndices . . . . .</b>                                 | <b>32</b> |

# 1 Introdução

Ao longo dos anos a área de telecomunicações vem, notoriamente, expandindo suas fronteiras. Transmissão a grandes velocidades, a maior qualidade nas transmissões, grandes quantidades de dados e a transmissão a grandes distâncias são benefícios provenientes deste progresso. Porém, este crescimento exige que os componentes de um sistema de comunicação funcionem a frequências extremamente elevadas, o que acaba sendo uma limitação dos materiais semicondutores e metálicos que os compõem. De acordo com (EYGLYS, 2010), ainda nos anos 80 os sistemas de comunicação baseados em cabos coaxiais chegavam próximo ao seu limite teórico de capacidade de transmissão. Além disso, (GATHAK; THYAGARAJAN, 2000) ressaltam que era de conhecimento que os sistemas de comunicação convencionais baseados em cabos coaxiais, radio e microondas e pares de cabos trançados, poderiam em breve alcançar um ponto de saturação.

Dispositivos ópticos têm sido apontados, pela comunidade científica, como a principal alternativa aos componentes eletrônicos por proporcionarem a transmissões a altas velocidades, perdas reduzidas e a capacidade de transferir grande quantidade de informação. A produção de fibras ópticas com baixas perdas de propagação e baixos valores de dispersão tornou possível o uso generalizado desses sistemas de comunicação óptica (OLIVEIRA, 2012). No ano 2000, os sistemas com componentes ópticos operavam a taxas além de 10Gb/s. estes transportavam cerca de 130000 canais de voz simultaneamente, de acordo com (MASSA, 2000). Novas tecnologias no campo da óptica procuram maximizar as características desejáveis dos sistemas ópticos.

A otimização da manipulação da luz em processos como confinamento, modulação e multiplexação em sistemas de comunicação é um ponto decisivo para a criação de sistemas totalmente ópticos. Segundo (DARTORA, 2010), atualmente, há uma tendência de um sistema totalmente óptico, reduzindo as partes eletrônicas ao mínimo, uma vez que estas são responsáveis por limitações da taxa de transmissão, devido a limites físicos insuperáveis no chaveamento de dispositivos eletrônicos.

O silício, já amplamente empregado na indústria eletrônica, é um dos principais materiais na construção de dispositivos ópticos devido à facilidade no processo de dopagem, sua estrutura cristalina e sua facilidade de obtenção. (LUI, 2014) afirma que, a fotônica baseada em silício surgiu como tecnologia chave para futuras interconexões de grande largura de banda para servidores, datacenters e sistemas de computação de alta performance devido ao seu potencial para oferecer um wafer CMOS compatível em escala com a tecnologia óptica integrada em um circuito integrado e o potencial do baixo custo de fabricação em alto volume, aproveitando a infra-estrutura desenvolvida para a eletrônica CMOS.

Ainda que possuam características bastante desejáveis para sistemas de comunicação, os dispositivos ópticos e guias de ondas ainda possuem desvantagens que podem ser contornadas, por exemplo, as perdas devidas à espalhamento e propagação entre guias de ondas (ainda que inferiores em relação aos seus análogos eletrônicos), atenuação de sinal e a distorção do sinal que podem ser um entrave na implementação de projetos.

## 1.1 Justificativa

Sistemas ópticos de comunicação tiveram maior visibilidade científica após a década de 70, com o surgimento do laser. Aliado a isto, segundo (BALBINOT; SILVEIRA, 2010), o advento das fibras ópticas (que não são condutores elétricos, pois transmitem sinais luminosos com comprimentos de onda na região do infravermelho), e portanto imune à perturbações eletromagnéticas foi um fator decisivo no desenvolvimento das comunicações ópticas.

Novos perfis de tráfego na Internet, como, por exemplo, a distribuição de vídeo sobre demanda, aplicações peer-to-peer e a computação em nuvem, requerem muito mais banda que as aplicações tradicionais, exercendo nas redes de telecomunicações uma contínua necessidade de aumento de capacidade (RIBEIRO, 2011). Essa infraestrutura e maior capacidade da rede promove um impacto direto no desenvolvimento de sistemas distribuídos, permitindo a comunicação mais eficiente entre os nós e robustez nas aplicações. A implantação de redes de comunicação ópticas permite que uma grande quantidade de dados seja transmitida de maneira eficiente, devido a alta faixa de frequência dos raios ópticos. Segundo RIBEIRO (2011), As redes ópticas evoluíram de “redes ponto a ponto”, com taxas de poucos gigabits por segundo e detecção direta, para “redes ópticas reconfiguráveis”, com taxas superiores a 100 Gb/s.

Redes totalmente ópticas são uma meta muito ambiciosa. Portanto, é bem provável que o controle do fluxo da luz em uma escala microscópica possa abrir uma nova era nos domínios da computação e de chips totalmente ópticos. Para tanto há a necessidade de tornar mais eficiente a manipulação dos sinais de luz nos sistemas. É preciso encontrar novos mecanismos físicos que possam melhorar a capacidade de manipular a luz, sendo assim, na busca da solução ideal surgiram várias propostas de novos dispositivos, como por exemplo, os dispositivos com índice de refração manipulável. Para tanto, guias de onda periódicos segmentados e crossings têm sido propostos e fabricados utilizando silício. Este material possui excelentes propriedades ópticas lineares e não lineares na faixa infra vermelha (IR) do espectro. Estas propriedades, associadas à excelente condutividade térmica e limiar de dano óptico do silício, abrem a possibilidade para um nova classe de dispositivos na faixa do infra vermelho (JALALI, 2006)

O requisito básico para virtualmente todos os dispositivos ópticos são as pequenas perdas de propagação ao longo dos guias de onda e cavidades que os compõem. Em guias de silício, devido ao alto índice de contraste entre o guia e o meio que o cerca (ar ou SiO<sub>2</sub>), a rugosidade da superfície resulta em perdas significativas (JALALI, 2006). Para tanto, durante a fabricação podem ser empregados diferentes materiais, os dispositivos podem ser submetidos a processos de oxidação térmica (que reduz a rugosidade nos guias), pode haver a criação de grades na superfície do guia de onda ou ainda tapers para incrementar a eficiência do acoplamento óptico.

Para JALALI (2006), uma das principais implicações dos guias de ondas e cavidade (passive devices) é a fabricação de filtros ópticos usados no processo de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM), dado que o carro chefe do processo é construído por grades de guias de ondas enfileiradas. A multiplexação por divisão do comprimento de onda é o processo que permite transmitir sinais com comprimentos de ondas diferentes através de um mesmo canal, esta é afetada diretamente pela melhoria da transmissão da luz. (GATHAK; THYAGARAJAN, 2000) afirmam que recentes desenvolvimentos em amplificadores ópticos e em WDM estão nos levando a sistemas de comunicação com quase

”zero”de perdas e largura de banda ”infinita”.

Reduzir perdas de propagação da luz implica em melhorias em diversos dispositivos, sistemas computacionais, protocolos e procedimentos de comunicação. Notavelmente em dispositivos que fazem uso de guias de ondas segmentados, que fornecem amplas melhorias nas comunicações ópticas. Conforme Halir et al (2013), o conceito empregado nos guias de ondas segmentados possui diversas aplicações, incluindo demultiplexadores, grades acopladoras de fibras para chips e crossings de guias.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é utilizar algoritmos baseados em inteligência de partículas, mais especificamente o Particle Swarm Optimization, para determinar a geometria e tamanho de componentes de sistemas ópticos, de modo à proporcionar menores perdas de luz ao longo do processamento desta pelos dispositivos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

São eles:

- Verificar os melhores parâmetros de entrada para o algoritmo Particle Swarm Optimization.
- Determinar geometrias mais apropriadas dos componentes ópticos de modo à obter perdas reduzidas.
- Validar a eficiência do método empregado analisando as perdas de energia via simulação.
- Comparar as perdas de energia entre dispositivos convencionais e dispositivos modelados a partir de algoritmos Particle Swarm Optimization.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho é formado por mais dois capítulos. No capítulo 2, é desenvolvido o referencial teórico, que aborda uma introdução óptica destacando histórico da comunicação óptica, a introdução sobre otimização, otimização e algoritmos evolutivos e, especificamente, algoritmos genéticos . Discute-se também, sobre guias de ondas convencionais e não convencionais, suas características e vantagens.

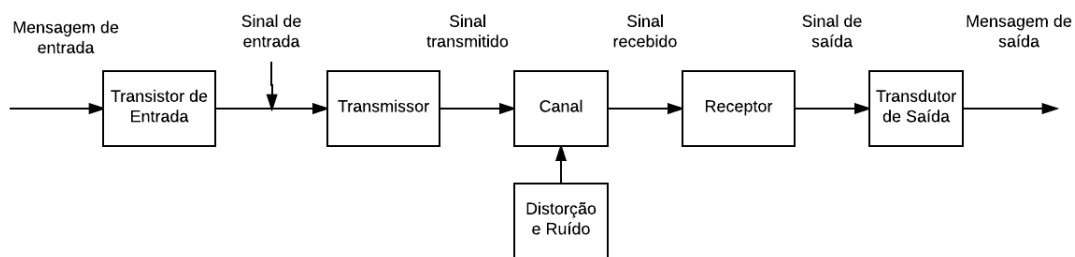
O capítulo seguinte apresenta a metodologia a ser seguida nas simulações, os softwares, plataformas utilizadas, o processo de desenvolvimento do algoritmo e como será medida sua eficiência.

## 2 Revisão de Literatura

### 2.1 Telecomunicações

(GATHAK; THYAGARAJAN, 2000) afirmam que, comunicação implica em transferir uma informação de um ponto a outro. Os sistemas de comunicação são aparatos utilizados para realizar essa transferência de informação. De modo genérico, os sistemas de comunicação são modelados como descrito na figura 1. Estes são constituídos por uma fonte, que produz a mensagem a ser transferida. A mensagem segue para transdutor de entrada, que converte a mensagem em uma grandeza física apropriada para transmissão, o sinal. Este, por sua vez, segue para o transmissor que o encaminha para o canal, o meio físico onde os sinais se propagam. Na outra extremidade do canal se encontra o receptor, que processa o sinal e enviando-o para um transdutor de saída. Este converte o sinal na forma original da mensagem.

**Figura 1** – *Modelo de Sistema de Comunicação.*



**Fonte** – *Adaptado de Lathi e Ding (2009)*

A constituição de um sistema de comunicação, em geral, diferem muito pouco da apresentada. O que realmente diferencia é como são realizados os processos e quais os materiais utilizados na construção de cada módulos.

#### 2.1.1 Perdas

Durante todo o processo de transmissão, a informação está sujeita à alterações indesejadas e perdas. Os sinais podem sofrer distorções e atenuações à medida que é transmitido, estes fenômenos são inerentes ao processo de transmissão. Segundo Lathi e Ding (2009) um canal se comporta parcialmente como um filtro que, em geral, atenua e distorce as formas de onda transmitidas.

Ainda durante a transmissão do sinal em um canal, o primeiro pode sofrer alterações proveniente de interferências e outras perturbações conhecidas como ruído. O ruído provoca alterações aleatórias nos sinais transmitidos.

Sua origem pode ser interna ou externa. Ruído externo pode vir de outros canais, de radiações, de componentes eletrônicos ou de correntes elétricas. Já o ruído interno é produzido pela agitação interna das moléculas do canal.

Durante o projeto de um sistema de comunicação, deve-se levar em consideração as prováveis causas de ruído, estratégias para reduzir ou eliminar o ruído.

A transmissão de informações é feita guiando os sinais até seus destinos finais. Os sinais podem ser enviados através de diversos meios como o ar, cabos metálicos e fibras ópticas. Na grande maioria dos casos os sinais gerados pelos transdutores( sinais de banda base) não estão de acordo com a frequência do canal, nesse caso os sinais não são deslocados na frequência.

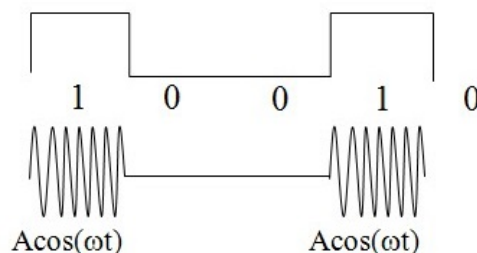
Outro problema decorrente na transmissão direta de sinais de banda base é transmissão por antenas. Segundo Lathi e Ding (2009), uma antena deve ter dimensões que sejam da ordem de uma fração ou mais do comprimento de onda do sinal de excitação para realizar a transmissão. Como sinais de banda base possuem baixas frequências, e consequentemente grandes comprimentos de onda, as antenas para transmitir-los teriam dimensões impraticáveis na prática.

Para contornar tais problemas utiliza-se a técnica de modulação, onde o sinal de banda base modifica parâmetros de uma senoide(onda portadora). Para cada parâmetro alterado é definido um tipo de modulação. Tem-se então, a modulação em amplitude (AM - Amplitude Modulation), modulação em frequência(FM - Frequency Modulation) e a modulação em fase (PM - Phase Modulation).

No âmbito digital, a modulação também é feita baseada nos três parâmetros básicos da onda portadora. A modulação por chaveamento em amplitude (Amplitude Shift Keying - ASK), Modulação por chaveamento em frequência (Frequency Shift Keying) e Modulação por chaveamento em fase (Phase Shift Keying - PSK).

A modulação ASK funciona de modo análogo à modulação AM, a amplitude da portadora é alterada conforme o sinal digital, geralmente ligado e desligado, porém na modulação multinível são empregados mais valores. A figura 2 mostra o comportamento da portadora e do sinal digital durante o processo.

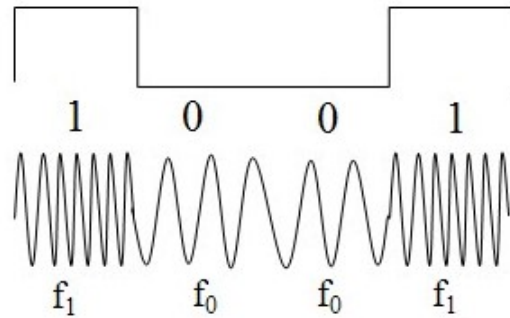
**Figura 2** – Modulação ASK



Fonte – (LATHI; DING, 2009)

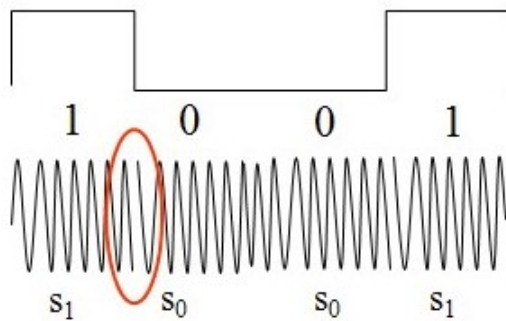
A modulação FSK consiste em variar a frequência da onda portadora de acordo com o sinal digital em questão. Para tanto, são usados dois moduladores um para pulsos com frequência  $F1$  para cada bit 1 e um para pulsos com frequência  $F2$  para cada bit 0, no caso de sinais binários. A figura 3 mostra a alteração na frequência decorrente do chaveamento do sinal digital.



**Figura 3** – *Modulação FSK*

Fonte – (LATHI; DING, 2009)

Por fim, a modulação PSK é realizada embutindo a informação nos parâmetros de fase da portadora. A cada mudança de 1 para 0, a fase da portadora é deslocada em  $180^\circ$ . A figura 4 exemplifica a mudança de fase da onda portadora devida ao chaveamento do sinal digital.

**Figura 4** – *Modulação PSK*

Fonte – (LATHI; DING, 2009)

### 2.1.2 Largura de Banda

Sistemas de comunicação possuem fatores limitantes no que diz respeito à capacidade de transferir dados. Um desses fatores é a largura de banda do canal. Lathi e Ding (2009) definem largura de banda como o intervalo máximo de frequências que um canal pode transmitir.

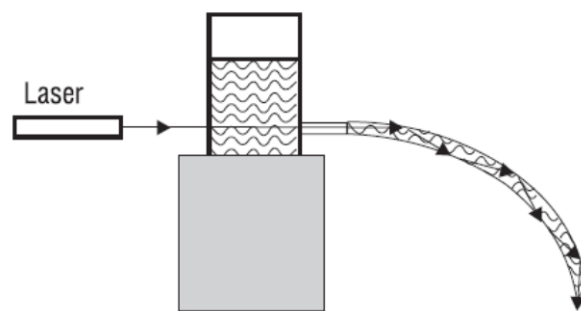
A largura de banda está intimamente relacionada à quantidade de informação que o canal pode transmitir, visto que, uma maior quantidade de informação pode ser transmitida aumentando a frequência da onda portadora. Esta relação é de grande importância para determinar a quantidade de informação transferida no canal.

As características físicas do canal determinam seus valores de largura de banda. Fibras ópticas, por exemplo, possuem uma largura de banda superior à 100Gbits/s.

## 2.2 Histórico das Comunicações Ópticas

Um importante marco da história das comunicações ópticas foi a capacidade de conduzir a luz através de trajetórias não retilíneas, eliminando a necessidade de arranjar em linha reta os componentes de um sistema óptico. Tal capacidade foi demonstrada pelo cientista Irlandês Jhon Tyndall, cujo experimento é ilustrado na figura 5. De acordo com Eyglys (2010), John Tyndall comprovou que seria possível transmitir luz por trajetória curvilíneas. Demonstrou, por meio de reflexões sucessivas e utilizando um recipiente cheio de água iluminada por um dos seus lados com um orifício em uma das paredes, que a luz se propagava ao longo do recipiente, saindo junto com a água pelo orifício.

**Figura 5** – Conceito do experimento de Tyndall



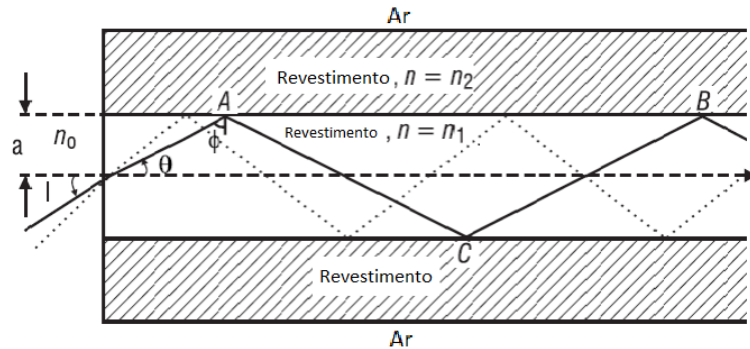
Fonte – (GATHAK; THYAGARAJAN, 2000)

O princípio descoberto por Tyndall é associado ao início das pesquisas relacionadas à transmissão de sinais luminosos através de materiais diversos. De acordo com Eyglys (2010), em 1910, Hondros e Derby comprovaram a possibilidade de transmitir a luz por guias de materiais transparentes. Porém devido à precariedade dos materiais e tecnologias da época, os pesquisadores não puderam chegar a resultados importantes na transmissão de luz guiada em grandes distâncias.

Durante a década de 1970 surgem as primeiras fibras ópticas (GATHAK; THYAGARAJAN, 2000). O nascimento das comunicações ópticas coincide com a fabricação de fibras de baixas perdas e a operação a temperatura ambiente de lasers em 1970. Ao longo dos anos as redes ópticas apresentam um crescimento notável devido as baixas perdas.

No núcleo de um sistema de comunicação óptica está a fibra óptica que atua como canal de transmissão carregando o raio de luz contendo a informação. A condução do raio de luz (através da fibra óptica) ocorre devido ao fenômeno da reflexão total interna (em inglês, TIR)(GATHAK; THYAGARAJAN, 2000). A reflexão interna que acontece na fibra óptica, mostrada na figura 6, é um caso particular do fenômeno de refração.

**Figura 6** – Reflexão Total Interna em Uma Fibra Óptica



Fonte – (GATHAK; THYAGARAJAN, 2000)

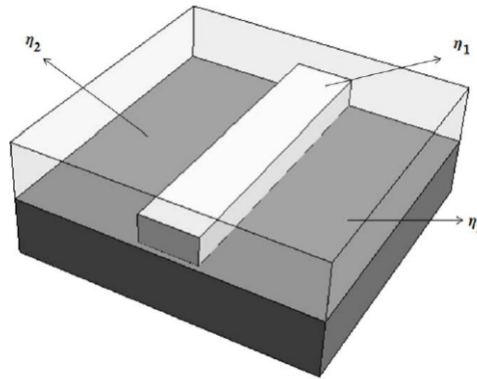
A refração é o fenômeno óptico que permite que a luz seja confinada dentro de um condutor, no caso a fibra óptica. Este fenômeno é descrito pela Lei de Snell, mostrada na equação 2.1 e enunciada da seguinte forma: "A razão entre o seno do ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) e o seno do ângulo de refração ( $\theta_2$ ) é constante e esta constante é igual ao índice de refração relativo  $n_{2,1}$ , para um dado comprimento de onda". Matematicamente, tem-se:

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2 \quad (2.1)$$

Para que este fenômeno ocorra e a luz seja confinada o índice de refração do núcleo, onde a luz será confinada, deve ser maior do que o índice que está ao seu redor.

## 2.3 Guias de Ondas

Guias de ondas são dispositivos ópticos utilizam o processo de confinamento da luz, através da reflexão interna total, para transmitir a informação. Um dos elementos mais simples a utilizar esse processo, chama-se Guia de Onda Dielétrico, ou simplesmente, Guia de Onda Planar (OLIVEIRA, 2012). Guias de ondas estão presentes nos sistemas de comunicação tanto na conexão entre os módulos do sistema como parte integrante de alguns dispositivos ópticos, em outras palavras, guias de onda atuam como elementos base de dispositivos ópticos. O modelo básico é mostrado na figura 7, onde onde são indicadas suas regiões e seus respectivos índices de refração,  $\eta_1$  e  $\eta_1$ , sendo  $\eta_2$  maior que  $\eta_1$  possibilitando assim o fenômeno da reflexão total, este que é o ponto chave do confinamento da luz em guias de onda.

**Figura 7 – Guia de Onda**

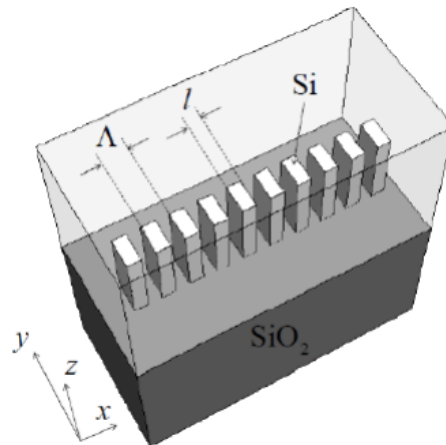
Fonte – (OLIVEIRA, 2012)

Silício é o material mais amplamente empregado na fabricação dos guias de ondas ópticos, o seu alto índice de refração permite que o fenômeno reflexão interna total aconteça quando este está imerso em materiais como óxido de silício ( $\text{SiO}$ ) ou até mesmo Ar. De acordo com (JALALI, 2006), o argumento tradicional a favor da fotônica do silício é baseado na compatibilidade da manufatura de circuitos integrados. Wafers de silício possuem o menor custo (por unidade de área) e a maior qualidade de cristal de um material semiconductor.

De acordo com Oliveira (2012) maior parte das perdas dos guias de ondas de Silício são devidas à propagação, o baixo coeficiente eletro-óptico, a baixa eficiência na emissão de luz e a alta perda no acoplamento entre o dispositivo óptico e a fibra óptica. As perdas por propagação são causadas pelas rugosidades das paredes geradas no processo de fabricação, já o baixo índice eletro-óptico e a baixa eficiência na emissão de luz são características intrínsecas do material e a perda entre dispositivo e fibra pode ser explicada pela diferença entre seções transversais dos dois.

Para reduzir as perdas nos guias de onda convencionais foram desenvolvidos guias de ondas segmentados, são guias de onda com geometrias não convencionais como mostrado na figura 8, onde  $\Lambda$  representa o intervalo entre dois segmentos subsequentes e  $l$  representa o comprimento de um segmento. Os materiais indicados,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Si}$ , são respectivamente Dióxido de Silício e Silício materiais amplamente utilizados na construção de dispositivos ópticos. Segundo Halir *et al.* (2013), Um guia de onda segmentado é, de forma simples, um estrutura composta de camadas alternadas de dois diferentes materiais com um afastamento menor que um comprimento de onda da luz que se propagará pelo meio, assim os efeitos da difração serão suprimidos.

Outra característica relevante dos guias de onda segmentados é a possibilidade de manipulação do índice de refração do seu núcleo ao longo do circuito óptico, criando um índice de refração efetivo. O índice de refração efetivo dos guias de onda segmentados está localizado entre os valores dos índices dos materiais que compõem a estrutura, proporcionando assim uma grande gama de índices possíveis. Schmid *et al.* (2011) afirma que, o efeito dos guias de ondas segmentados permite controlar o índice de refração efetivo do núcleo, do guia de onda, ao longo do intervalo entre os valores do material de revestimento e o silício através de padronização litográfica.

**Figura 8** – *Guia de Onda Segmentado*

Fonte – (OLIVEIRA, 2012)

Guias de ondas segmentados proporcionam menores perdas do que seus análogos contínuos. Segundo Rodriguez-Esquerre *et al.* (2011), o alto contraste entre os índices de refração, nos guias de ondas contínuos, resulta em uma grande dispersão em imperfeições de contorno núcleo-revestimento.

Perdas ainda podem ocorrer quando há guias de ondas, ou dispositivos, com seções transversais diferentes. Um dos possíveis caso é mostrado por Choudhury *et al.* (2005), uma grande disparidade entre a fibra óptica comum e o guia de onda de alto índice de contraste torna difícil o acoplamento da luz no chip. Para tornar mais eficiente o acoplamento da luz utiliza-se Tapers. Segundo Sisnando *et al.* (2012), tapers são guias de ondas que tem um formato variável ao longo do seu comprimento. Eles são utilizados principalmente para melhorar o acoplamento da luz entre guias com seções transversais diferentes.

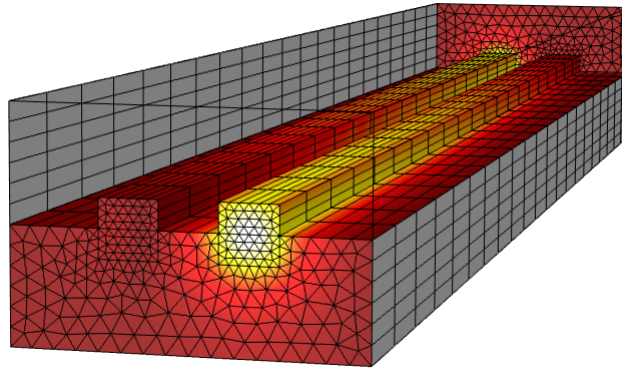
### 2.3.1 Simulação

De modo a validar a metodologia adotada neste trabalho, será realizada uma série de simulações do dispositivo em questão, antes e após a otimização, e também comparação com resultados encontrados na literatura. A principal vantagem da simulação se deve ao fato de não ser necessário implementar o sistema diversas vezes durante o processo de otimização. Além disso, Sisnando *et al.* (2012) afirma que Devido ao custo elevado para se fabricar tais dispositivos devido a redução da área e das perdas por propagação, utiliza-se métodos numéricos na simulação desses componentes ópticos integrados os quais permitem maneiras diferentes de se explorar novas ideias para esses dispositivos, reduzindo os custos através da redução dos processos de fabricação e testes.

A Análise utilizando elementos finitos é utilizada por softwares de simulação já conceituados como Autocad<sup>TM</sup> e Solidworks<sup>TM</sup>. Para dispositivos ópticos é utilizando o Método dos Elementos Finitos em duas dimensões (FEM 2D, em inglês). Este método consiste em dividir o sistema em questão em partes menores de análise mais simples, os elementos finitos, e as equações de cada uma dessas partes é parte de um grande sistema de equações algébricas. A figura 9 exemplifica a divisão de um acoplador óptico em elementos finitos para uma posterior análise.

Dentre trabalhos que empregam tal técnica destaca-se Santos (2009) que utiliza a modelagem de diferentes dispositivos ópticos utilizando FEM 2D, com resultados satisfatórios, os dispositivos projetados.

**Figura 9** – *Divisão em Elementos Finitos*



Outro exemplo bem sucedido dessa abordagem é Burger Klose (2005) que em seu trabalho propõe a utilização do Método dos elementos finitos para o cálculo de campo elétrico em cristais fotônicos em três dimensões e guias de ondas de cristais fotônicos. Os valores obtidos com o método utilizado foram condizentes com valores calculados na teoria.

## 2.4 Otimização

Otimização é uma tarefa bastante recorrente na engenharia e nas ciências exatas. Diz respeito a encontrar parâmetros ótimos ou aproximadamente ótimos para um determinado sistema ou função, diminuindo custos ou aumentando a eficiência. Segundo Koide (2013), normalmente o objetivo da otimização de um projeto é melhorar a sua eficiência e diminuir seu custo. A otimização busca, portanto, determinar qual é o melhor projeto, sem que seja necessário computar todas as possíveis alternativas.

Para qualificar as possíveis soluções deve ser definida uma função objetivo para o sistema em questão. As técnicas de otimização buscam encontrar valores que façam a função objetivo do problema alcançar um valor máximo (ou mínimo, a depender do objetivo) e que seja viável para o sistema. A função objetivo e as funções de restrições dependem das variáveis de projeto. As variáveis de projeto são aquelas que sofrem alterações durante o processo de otimização. As restrições são funções que estabelecem limites permitidos pelas variáveis (KOIDE, 2013).

A modelagem matemática do sistema é frequentemente um dos entraves principais do processo. O sistema pode apresentar variações em grandezas difíceis de avaliar ou não é totalmente conhecido. A otimização torna-se uma tarefa bastante complicada quando há diversas possibilidades de soluções, ou seja, quando o espaço de busca é bastante extenso. Muitos problemas de engenharia também não podem ser tratados através de métodos analíticos, seja por causa da dificuldade de formulação da modelagem ou do esforço matemático exigido na solução, principalmente quando estão envolvidas funções não-diferenciáveis ou descontínuas (SERAPIÃO, 2009).

Além disso, outro entrave frequente da otimização, através de métodos convenci-

onais, é o conhecimento prévio do domínio da aplicação, o modo como funções variam, suas descontinuidades, a existência de máximos e mínimos locais. Frequentemente são empregados métodos que fazem uso do gradiente ou do hessiano de funções. De acordo com Medeiros (2005), essas técnicas, no entanto, quando aplicadas a domínios de aplicações multimodais complexos, não são adequadas, podendo estacionar em ótimos locais e conduzir a soluções subótimas.

Devido a tais restrições o processo de otimização pode tornar-se muito complexa, podendo tornar o processo computacionalmente oneroso, tornando o projeto difícil de ser otimizado.

## 2.5 *Algoritmos Bio-Inspirados*

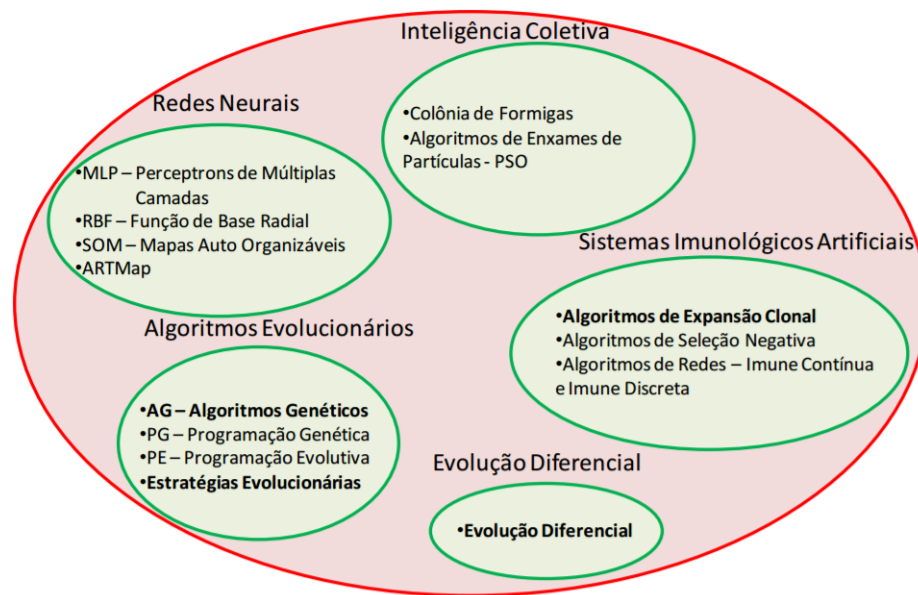
Algoritmos de otimização determinísticos, frequentemente, enfrentam problemas quando aplicados à processos de complexidade superior. Problemas de otimização complexos, frequentemente, possuem uma grande quantidade de máximos e mínimos locais, o que pode levar algoritmos determinísticos de otimização à "estacionarem" nesses pontos locais (KOIDE, 2013). A otimização utilizando algoritmos determinísticos pode tender para um ponto de ótimo local em vez de um ótimo global, dependendo do ponto inicial. Além disso, se o ponto inicial estiver em uma região infactível, ou seja, inviável, o algoritmo pode convergir para um ótimo local infactível.

Devido ao problemas no métodos de otimização determinísticos, faz-se necessário um conjunto de métodos que produzam soluções satisfatórias, com um tempo de computação aceitável e contornando os problemas citados acima.

Técnicas de otimização estocásticas(não-determinísticas) têm se destacado por não serem sensíveis ao ponto inicial, efetuando a busca em uma grande região, escapando de estagnar num ótimo local e poder tratar problemas em variáveis contínuas, discretas ou mistas com a mesma facilidade (KOIDE, 2013). Alguns desses métodos não determinísticos são algoritmos que exploram o espaço de busca a partir de meta-heurísticas.

Koide (2013) define meta-heurística como um tipo de algoritmo inteligente onde técnicas de alto nível(meta = alto nível, do prefixo grego) são aplicadas à procedimentos heurísticos (do grego heuriskein = descobrir). Estes são empregados para resolver problemas difíceis de otimização e conseguem resultados com menor custo computacional. Metaheurísticas bastante comuns no meio científico são baseadas em processos naturais ou sociais.

Neste nicho de algoritmos inserem-se os algoritmos bioinspirados, que baseiam seu funcionamento em processos biológicos, fenômenos naturais ou comportamento social de certas espécies. Dentro desta grande classe de algoritmos podem ser encontrados diferentes tipos como Algoritmos Evolucionários, Redes Neurais ou Algoritmos de inteligência coletiva, esta relação é mostrada na figura 10.

**Figura 10** – *Algoritmos Bioinspirados*

Fonte – (SISNANDO et al., 2012)

Devido às qualidades apresentadas estes algoritmos. De acordo com Serapião (2009), nos últimos tempos, algoritmos bioinspirados baseados em populações e metaheurísticas vêm sendo usados para resolver problemas de busca e otimização em vários domínios de problemas para os quais soluções robustas são difíceis ou impossíveis de encontrar usando abordagens tradicionais como a programação matemática.

O ponto fundamental desses algoritmos é a população e suas interações sociais. Durante a sua execução a população tende a evoluir, através de regras bem definidas, em direção a melhores soluções para o problema, formando um sistema auto-organizado. A sociedade pode ser vista, portanto, como uma entidade distribuída de processamento de informação (MELLO, 2012).

A comparação entre alguns métodos bio-inspirados, Redes Neurais e Inteligência de Partículas, e métodos determinísticos é mostrada na tabela 1.

**Tabela 1** – *Comparação entre métodos de otimização*

|                            | Complexidade | Conhecimento Prévio  | Espaço de busca          |
|----------------------------|--------------|----------------------|--------------------------|
| Redes Neurais              | Baixa        | Dados de treinamento | Boa análise do espaço    |
| Inteligência de Partículas | Baixa        | Não exige            | Boa análise do espaço    |
| Métodos Determinísticos    | Alta         | Exige dados          | Mínimos e máximos locais |

### 2.5.1 Particle Swarm Optimization - PSO

Dentre os algoritmos bio-inspirados que se utilizam das interações populacionais para resolução de problemas merece destaque o algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization), descrito inicialmente em 1995 por James Kennedy e Russel C. Esta técnica é baseada na Inteligência de enxames, inspirada no comportamento social de colônias de formigas, cardumes de peixes e bandos de aves na busca por alimento em uma determinada região. Nesta classe de algoritmos a interação entre os indivíduos permite uma melhor exploração



do espaço de busca, convergindo para uma solução melhor do que as soluções encontradas por métodos determinísticos.

Essa comunicação entre os indivíduos é um ponto chave no processo para encontrar a solução desejada. De acordo com Serapião (2009) cada indivíduo de uma população possui sua própria experiência e é capaz de estimar a qualidade dessa experiência. Como os indivíduos são sociais, eles também possuem conhecimentos sobre como seus vizinhos comportam-se. Esses dois tipos de informação correspondem à aprendizagem individual (cognitiva) e à transmissão cultural (social), respectivamente. Portanto, a probabilidade de que um determinado indivíduo tome uma certa decisão será uma função de seu desempenho no passado e do desempenho de alguns de seus vizinhos.

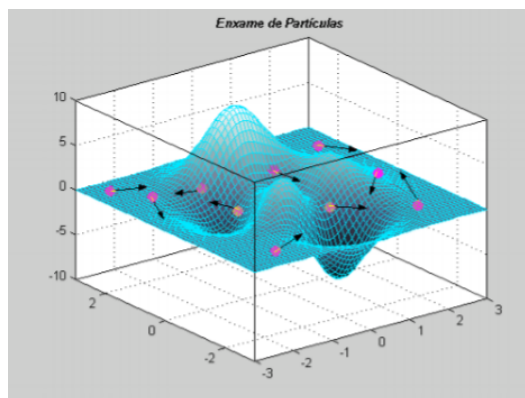
Nesse tipo de algoritmo a solução do problema é um ponto no espaço de busca. Na maioria dos casos, os indivíduos são representados por vetores de dimensão  $n$ , onde  $n$  é a dimensão do espaço de busca, a posição é atualizada sucessivamente para diferentes valores do espaço de busca, de acordo com a aprendizagem individual e cultural de cada indivíduo.

Os principais métodos de PSO empregam duas formas de qualificar o conhecimento adquirido para a tomada de decisões. A primeira é o conhecimento advindo das interações sociais, ou seja, os resultados dos demais membros da população influenciam as decisões dos indivíduos. E a outra forma é o conhecimento individual, baseado nas experiências anteriores de cada indivíduo.

No algoritmo os indivíduos possuem velocidades e são avaliados por uma função de objetivo. Segundo (MEDEIROS, 2005), cada partícula modifica sua velocidade levando em conta a melhor posição da partícula e a melhor posição do grupo, e ao longo do tempo o grupo acaba alcançando o alimento.

Inicialmente os indivíduos são inicializados com posições e velocidades randômicas, como mostrado na figura 7. Ao longo da sua execução as posições de cada partícula vão sendo atualizadas com base nas suas velocidades, processo exemplificado na figura 11. A velocidade é atualizada com base na melhor posição alcançada pelo indivíduo e pelo grupo, conforme explicado na figura 12.

**Figura 11** – *Enxame de Partículas*



Fonte – (MEDEIROS, 2005)

A modelagem matemática básica da atualização dos valores no PSO são mostrados nas equações 2.2 e 2.3, mostrando a atualização da velocidade e da posição dos

insdivíduos,respectivamente.

$$v_{k+1}^{\rightarrow} = \vec{a} \otimes \vec{v}_k + \vec{b}_1 \otimes \vec{r}_1 \otimes (\vec{p}_1 - \vec{x}_k) + \vec{b}_2 \otimes \vec{r}_2 \otimes (\vec{p}_2 - \vec{x}_k) \quad (2.2)$$

$$x_{k+1}^{\rightarrow} = \vec{c} \otimes \vec{x}_k + \vec{d} \otimes v_{k+1}^{\rightarrow} \quad (2.3)$$

onde:

$\otimes$  produto vetorial

$\vec{v}$  vetor velocidade da partícula

$\vec{x}$  vetor posição da partícula

$\vec{a}$  fator demomento

$\vec{p}_1$  melhor posição anterior da partícula

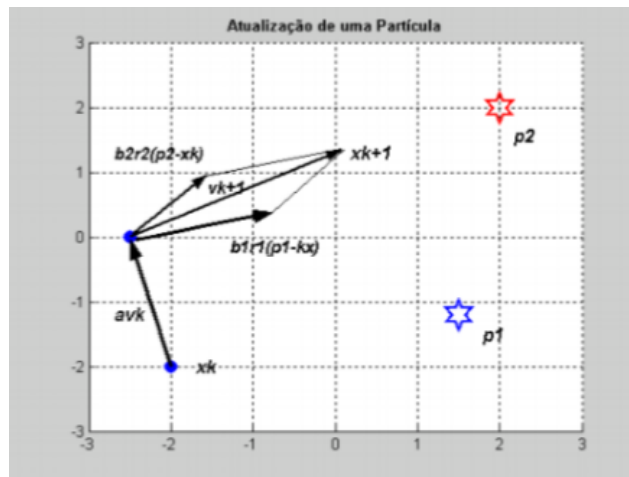
$\vec{p}_2$  melhor posição anterior do enxame

$b_1, b_2$  coeficientes de força de atração

$\vec{r}_1, \vec{r}_2$  vetores de números randômicos no intervalo de [0.1]

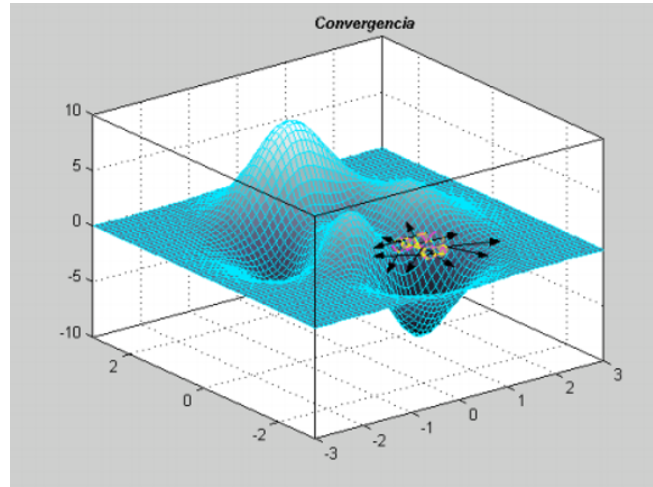
$\vec{c}, \vec{d}$  vetores coeficientes

**Figura 12** – *Atualização da Velocidade da Partícula*



Fonte – (MEDEIROS, 2005)

Após sucessivas iterações o conhecimento individual e o conhecimento proveniente das interações sociais levam o enxame à convergir para uma determinada área do espaço de busca, esta é a área onde se encontra a solução ótima para o problema. Um exemplo de convergência é mostrado na figura 13.

**Figura 13** – *Convergência do Algoritmo PSO*

Fonte – (MEDEIROS, 2005)

Para que o indivíduo não se localize em posições fora do espaço de busca, uma velocidade máxima pode ser estipulada, de acordo com as equações 2.4 e 2.5.

$$v_i > v_{max} \implies v_i = v_{max} \quad (2.4)$$

$$v_i < -v_{max} \implies v_i = -v_{max} \quad (2.5)$$

CrITÉRIOS de parada possíveis para o algoritmo podem ser o número máximo de iterações ou até que seja atingida a velocidade máxima estipulada.

Ainda que seja uma classe de algoritmos bastante efetivos o PSO é relativamente simples, se comparado a outras técnicas bio inspiradas, como os algoritmos genéticos ou a otimização por colônia de formigas, o que o torna uma alternativa bastante viável quando o poder computacional for limitado. Em seu trabalho Algustus (2009) afirma que, comparado com algoritmos genéticos, o PSO tem vantagens de ser mais fácil de implementar e existem poucos parâmetros para serem ajustados.

## 3 Materiais e Métodos

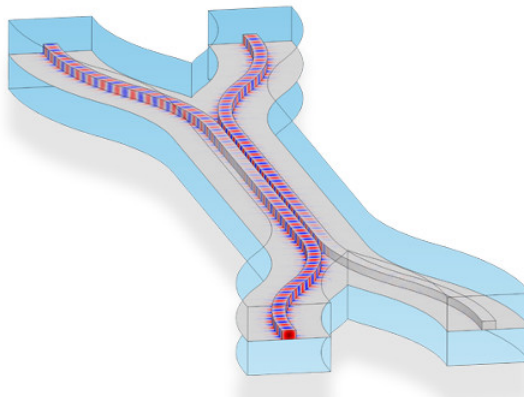
Nesta seção é apresentado o tipo de pesquisa desenvolvido no projeto, os detalhes de todo o material utilizado e os procedimentos metodológicos para a implementação do trabalho.

### 3.1 Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics é uma plataforma de software genérica, do grupo COMSOL, utilizada em modelagem e simulação de sistemas físicos. A plataforma utiliza o método dos elementos finitos na simulação e na modelagem. A própria plataforma oferece uma grande quantidade de materiais, métodos de análise de equações, métodos numéricos, módulos de visualização de resultados e permite importar e exportar conteúdo.

O método de modelagem do sistema permite que o usuário tenha acesso às funcionalidades do sistema como geometria, malhas, condições de limite e visualizações. Permitindo um estudo aprofundado dos fenômenos físicos no decorrer da simulação.

No Comsol Multiphysics são oferecidos vários módulos que permitem modelar sistemas físicos específicos, contendo ferramentas de modelagem, materiais e métodos de análise dedicados para o sistema, por exemplo, os módulos para sistemas mecânicos e hidráulicos. Dentre tais módulos está o módulo "Wave Optics" para simulações ópticas. Este possibilita a modelagem de componentes ópticos, simular a propagação óptica em meios lineares e não lineares, calcular perdas e ganhos durante a passagem da onda pelos meios. A análise pode ser feita tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. A figura 9 mostra um dispositivo óptico modelado utilizando o Comsol Multiphysics.



**Figura 14** – *Modelo de Dispositivo Óptico Desenvolvido com o Comsol*

A plataforma Comsol Multiphysics será utilizada neste trabalho para modelar e simular acopladores ópticos com geometrias convencionais, acopladores com geometrias determinadas por algoritmos evolutivos e, por fim, analisar as perdas de energia, validando assim a eficiência do método empregado.

Além do módulo específico de óptica o Comsol Multiphysics possui a capacidade de integração com outras plataformas como Autocad, Solidworks, Excel e Matlab. Neste

trabalho, é de grande interesse a integração com o Matlab. Pois este atua diretamente no modelo exportado, na forma de uma matriz, de acordo com as etapas do algoritmo desejado.

### 3.2 Matlab

Matlab é uma linguagem de programação de alto nível e um ambiente interativo de cálculo numérico, da empresa Mathworks. A plataforma integra funcionalidades como operações com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos.

Criada na década de 1970 na Universidade do Novo Mexico, a plataforma logo popularizou-se entre matemáticos e engenheiros. Apresentando facilidades como a sintaxe muito semelhante à linguagens bastante difundidas na época, C e Fortran, e possibilitar que as soluções dos problemas fossem escritas de maneira muito próximas da formulação matemática.

Atualmente o Matlab dispõe de ferramentas nativas para computação numérica de alta performance, visualização de e manipulação de dados, desenvolvimento de aplicativos e desenvolvimento de algoritmos. Além das ferramentas nativas o Matlab possui módulos (Toolboxes) que expandem as funcionalidades da plataforma, permitindo o trabalho em sistemas de comunicação, processamento de imagem e sistemas de controle.

Neste trabalho, o algoritmo evolutivo PSO será escrito em Matlab, devido à grande quantidade de funções nativas e à possibilidade de integração com a plataforma Comsol Multiphysics.

### 3.3 Cronograma de Trabalho

As etapas seguidas neste trabalho estão de acordo com a tabela 2. A primeira etapa será a modelagem do sistema onde haverá o acoplamento óptico, realizado no Comsol Multiphysics. Seguindo o fluxo de trabalho o algoritmo do PSO será desenvolvido na plataforma Matlab e, utilizando o modelo exportado da plataforma Comsol, o resultado será aplicado novamente no modelo desenvolvido na plataforma comsol. Esta classe de algoritmos, PSO, foi escolhida devido à sua capacidade de explorar o espaço de busca e a relativa facilidade na sua implementação.

Para validar o resultado do algoritmo será utilizado novamente o comsol para realizar a simulação do acoplamento óptico.

**Tabela 2** – Fluxo de trabalho do projeto

|           | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro |
|-----------|---------|----------|----------|---------|
| Pesquisa  |         |          |          |         |
| Modelagem |         |          |          |         |
| Simulação |         |          |          |         |
| Escrita   |         |          |          |         |

## Considerações Finais

Neste trabalho foi possível realizar uma revisão bibliográfica aprofundando o conhecimento teórico. O conhecimento adquirido pode ser utilizado na definição dos passos seguintes do projeto.

O estudo realizado mostra que a otimização do acoplamento óptico, por meio de algoritmos evolutivos, é de grande importância para a evolução das comunicações ópticas. As simulações e validações feitas via software são viáveis.

# Referências

- ALGUSTUS, G. Inteligência de enxame e o algoritmo das abelhas. 2009.
- BALBINOT, R.; SILVEIRA, J. G. Apostila de comunicações Ópticas. 2010.
- BURGER KLOSE, S. S. Z. Silicon photonics. 2005.
- CHOUDHURY, A. N. M.; STANCZYK, T. R.; RICHARDSON, D.; DONVAL, A.; ORON, R.; ORON, M. Method of improving light coupling efficiency between optical fibers and silicon waveguides. 2005.
- DARTORA, C. A. Dispositivos Ópticos: Filtors,acopladores e splitters. 2010.
- EYGLYS, K. *Sistema de Comunicação Óptica*. [S.l.: s.n.], 2010.
- GATHAK, A.; THYAGARAJAN, k. Optical waveguides and fibers. 2000.
- HALIR, R.; ORTEGA-MONUX, A.; MAESE-NOVO, A. Engineering the optical properties of silicon using sub-wavelength structures. 2013.
- JALALI, B. Silicon photonics. 2006.
- KOIDE, R. M. *Algoritmo de Colônia de Formigas Aplicado À Otimização de Materiais Laminados*. Tese (Doutorado), 2013.
- LATHI, B. P.; DING, Z. *Dispositivos Ópticos: Filtors,Acopladores e Splitters*. [S.l.: s.n.], 2009.
- LUI, H.-F. Integrated silicon photonics links for high bandwidth data transportation. 2014.
- MASSA, N. Fiber optic communication. 2000.
- MEDEIROS, J. A. C. C. *Enxame de Partículas Como Ferramenta de Otimização em Problemas Complexos de Engenharia Nuclear*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2005.
- MELLO, A. G. de S. Otimização por enxame de partículas. 2012.
- OLIVEIRA, A. J. R. F. Análise de dispositivos baseados em guias não convencionais para aplicações em telecomunicações. 2012.
- RODRIGUEZ-ESQUERRE, V. F.; MERCEDES, C. R.; JR, I. T. L.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H. Periodic segmented waveguide analyis by using the 2d finite element method. 2011.
- SANTOS, C. H. Desing of photonic devices using bio-inspired algorithms. 2009.
- SCHIMID, J. H.; CHEBEN, P.; BOCK, P. J.; HALIR, J.; LAPOINTE, J.; JANZ, S.; DELâGE, A.; DENSMORE, A.; FÉDELI, J. M.; HALL, T. J.; LAMONTAGNE, B.; MA, R.; MOLINA-FERNANDEZ, I.; XU, D. X. Refractive index engineering with subwavelength gratings in silicon microphotronics waveguides. 2011.

SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. 2009.

SISNANDO, A. D.; VIEIRA, L. da F.; RODRIGUEZ-ESQUERRE, V. F.; MERCEDES, C. R. Taper desing and optimization by evolutionary algorithms. 2012.