

Otimização da Rede de Transportes Ópticas: Revisão e Complexidade

Rayane Araújo Lima (Pontifícia Universidade Católica de Goiás)

rayane_araujo_lima@hotmail.com

Bruno Quirino de Oliveira (Pontifícia Universidade Católica de Goiás)

brquirino@gmail.com

Marcos Lajovic Carneiro (Pontifícia Universidade Católica de Goiás)

mcarneiro@pucgoias.edu.br



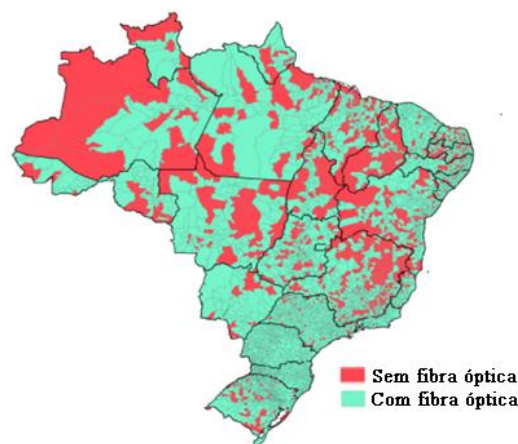
Neste artigo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a otimização do projeto de redes de fibra óptica e o avanço nos algoritmos metaheurísticos utilizados para este propósito de 1990 a 2020. Essa otimização requer o tratamento de problemas técnicos e econômicos como, a alocação de recursos de enlaces e nós, a proteção de falhas, limitações orçamentárias, dentre outros. Devido à natureza desses desafios, as metaheurísticas bio-inspiradas baseadas em inteligência de enxame tem sido um conjunto de técnicas promissoras para o fornecimento de soluções para problemas complexos de otimização combinatória, conforme os dados apresentados nesta revisão. O artigo apresenta o estado-da-arte com relação ao uso de algoritmos bio-inspirados para a otimização do projeto de rede de fibra óptica, as principais complexidades ao implementar esse tipo de metodologia, as lacunas e oportunidades de pesquisa nesse contexto.

Palavras-chave: Projeto de rede, Fibra óptica, Metaheurística.

1.Introdução

As tecnologias das redes ópticas oferecem um aumento geral na taxa de transmissão para 100 Gbps, 400 Gbps ou até mesmo 1 Tbps. Os avanços em pesquisas vêm ocorrendo para a tecnologia 6G (ALSHARIF *et al.*, 2020), enquanto que muitos países ainda não possuem o 5G implantado. Uma das razões é que a estrutura para a recepção da tecnologia 5G necessita de uma rede de fibra óptica para a transmissão dos dados entre centrais. A Figura 1 apresenta um cenário recente no Brasil, em que existem muitos municípios que não estão contemplados pela tecnologia de fibra óptica e essa realidade é vivida em muitos outros países (BRODKIN, 2019). O desenho de redes de comunicações é um problema formado por vários subproblemas, como a locação de recursos de enlaces e nós, problemas de proteção na falha de enlaces e nós, entre outros. A limitação orçamentária é outro fator a ser previsto, pois nem sempre é possível implantar todos os sistemas necessários ao atendimento pleno da demanda. Logo, precisa-se contemplar fatores técnicos e econômicos que vão além da tarefa de planejar a rede objetivando o custo mínimo, seja na implantação, aluguel, manutenção e/ou operação, portanto, são necessárias técnicas computacionais de otimização para esta tarefa. Implantar soluções que signifiquem garantia de participação no mercado e receitas compensadoras é uma questão de sobrevivência para as empresas (DESOUSA, DEOLIVEIRA *et al.*, 2014).

Figura 1 - Infraestrutura brasileira de fibra óptica



(ANATEL, 2021)

As metaheurísticas são algoritmos que coordenam heurísticas e regras simples para encontrar soluções quase ótimas para Problemas de Otimização Combinatória (POCs). Esses POCs podem ser encontradas em diversas áreas como a logística, os transportes, os cuidados de saúde,

a produção, as cidades inteligentes e os sistemas de telecomunicações (YANG, JIANG e NGUYEN, 2013).

O objetivo principal desta revisão é apresentar o estado-da-arte das abordagens atualmente consideradas mais relevantes para aumentar o desempenho das redes ópticas por uso de mecanismos de metaheurísticas bioinspirada baseada em inteligência de enxame e apontar lacunas e oportunidades prevista nessa área.

Este artigo apresenta de forma objetiva como foi realizada a seleção de artigos para revisão, quais as bases de dados e a bibliometria relacionada com a pesquisa na seção 2. Na seção 3 é apresentada uma introdução sobre projeto de redes de fibra óptica e uma breve revisão das metaheurísticas bioinspiradas baseadas em inteligência de enxame mais conhecidos. A seção 4 apresenta uma análise sobre as mtaheurístiscas em sistemas de telecomunicações. A seção 5 indica quais os principais desafios enfrentados devido à complexidade do uso dessas técnicas na otimização do projeto de rede óptica e lacunas de pesquisa. Finalmente, a Seção 6 conclui o trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. Metodologia de Busca de Artigos

Foram coletadas publicações sobre métodos metaheurísticos no período 2010-2020, e para uma análise mais sucinta, publicações sobre métodos heurísticos no período 1990-2020 foi realizada. O quadro da Figura 2 apresenta a lógica de busca e construção da Figura 3 (listada no item 1). Esta condição foi aplicada ao título, resumo ou palavras chaves dos artigos. Na Figura 4, seus termos de busca e bases de dados estão no item 2 do Quadro da Figura 2. Esta condição foi aplicada ao título dos artigos com o foco em encontrar artigos que abordassem a metaheurística na otimização do problema do projeto de rede óptica.

Figura 2 - Quadro de termos chaves de busca

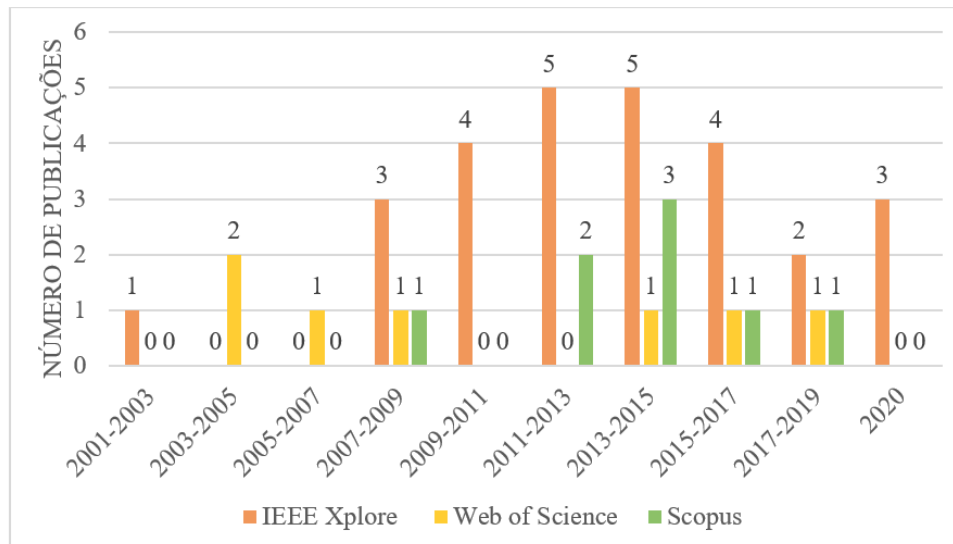
ITEM	PALAVRA - CHAVE	BASE DE DADOS		
1	"Metaheuristic " AND " optical fiber in network design "			
2	"Bio-inspired algorithms based on swarm intelligence " AND " telecommunication systems "	IEEE Xplore	Web of Science	Scopus

Fonte: Próprio autor

Os artigos foram divididos em estudos relativos às técnicas de otimização bio-inspiradas baseadas em inteligência de enxame: *Ant Colony Optimization* (ACO), *Artificial Bee Colony* (ABC), *Bacterial Foraging Optimization* (BFO), *Bee Colony Optimization* (BCO), *Wolf Search*

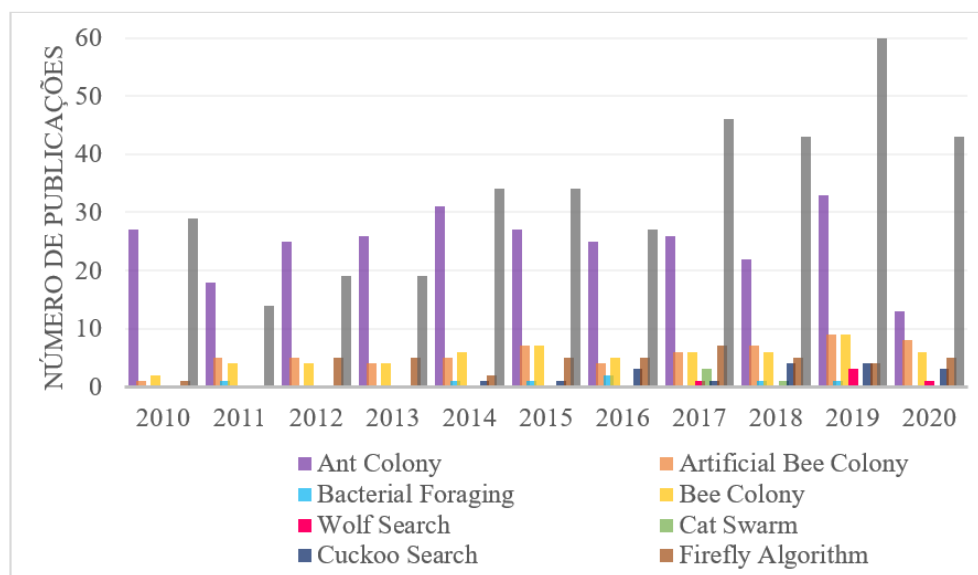
Algorithm (WSA), Cat Swarm Optimization (CSO), Cuckoo Search (CS), Firefly Algorithm (FA) e Particle Swarm Optimization (PSO).

Figura 3 - Metaheurísticas no projeto de redes de fibra óptica nos últimos vinte anos em três bases de dados



Fonte: Próprio autor

Figura 4 - Algoritmos bioinspirados baseados em inteligência de enxame aplicados a sistemas de telecomunicações nos últimos dez anos



Fonte: Próprio autor

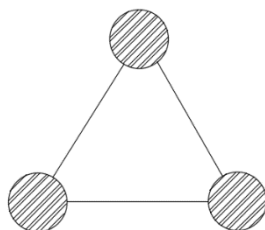
3.Sistemas de Telecomunicações e Métodos Heurísticos Bioinspirados

Sistemas de telecomunicações podem ser definidos como sistemas ou subsistemas interconectados que utilizam equipamentos no armazenamento, manipulação, movimento, no controle, na transmissão ou na recepção de voz, vídeo e/ou dados e podem ser inclusos

softwares e hardwares. A interconexão entre no mínimo dois pontos de comunicação podem ser chamados de rede.

Uma rede pode ser definida como um grafo de forma (V, E) , onde V são chamados de vértices (nós – fontes e/ou destinos das demandas) e E são os elementos chamados de arcos (caminho em que as demandas escoam), e para cada arco (i, j) os vértices i e j representam a ponta inicial e a ponta final de (i, j) respectivamente, a Figura 5 mostra um exemplo simples de rede, onde cada nó está conectado a outros dois nós, isto é, a topologia de rede se parece com um triângulo.

Figura 5 - Grafo simples com três vértices e três arcos



Fonte: Próprio autor

A forma que a demanda é tratada no processo de modelagem pode apresentar duas formulações distintas: formulação nó-arco e arco-caminho. A formulação nó-arco tem como base a conservação de fluxo, em todos os nós da rede, o fluxo total de entrada do nó é igual ao total do fluxo de saída a partir do nó, essa formulação contém restrição de escoamento e conservação em todos os nós. A formulação arco-caminho, é formada por um conjunto de caminhos (rotas), formadas por caminhos pré-estabelecidos. As demandas precisam escoar ao mesmo tempo, assim é escolhido o caminho para que cada demanda saia do seu nó de origem e chegue até seu nó destino. Alguns dos principais pontos de referência em que uma rede é avaliada é a capacidade, confiabilidade, custo, escalabilidade e simplicidade (SIMMONS, 2014).

3.1 Projeto de Rede Óptica

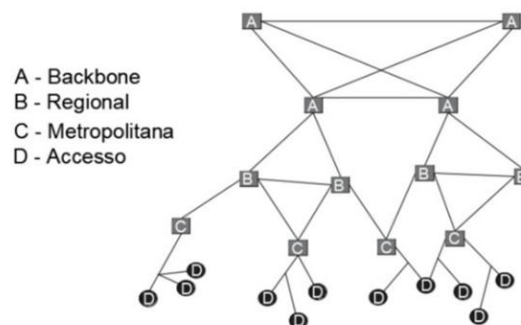
Tecnologias como 5G e indústria 4.0 faz com que a demanda por internet aumente de forma significativa. Esse aumento faz surgir um grande número de desafios complexos que os tomadores de decisões devem enfrentar. Alguns desses desafios são o roteamento, alocação de canais e projeto de rede.

O projeto de rede pode ser dividido de forma estrutural em camadas hierárquicas geográficas (Figura 6), que são recomendadas e padronizadas pela ITU-T (*INTERNATIONAL*

COMMUNICATION UNION, 2021). No nível de rede de “acesso”, o tráfego é distribuído/coletado para os clientes de forma imediata com a conexão entre cliente e provedor (operadoras de telecomunicações). Os meios físicos são dedicados a clientes ou grupos de pequeno porte, possuem baixa capacidade de multiplexação e possui hubs para se conectarem na camada metropolitana. Já na camada “metropolitana” os seus recursos que estão disponíveis aos clientes estão conectados pela rede de acesso. No próximo nível hierárquico, a rede “regional” que transporta parte do tráfego que se estende as áreas metropolitanas e possui centenas de milhares de clientes, a conexão é feita pela rede *backbone* e atende milhares de clientes associados a camada regional e possui longa distância, e em seus nós são necessários regeneradores ópticos garantindo a qualidade do sinal.

A classificação do tipo de rede pode ser de acordo com as informações sobre o tráfego em três categorias: a) determinístico, b) estocástico e c) robusto. Em uma rede determinística conhece-se o padrão de tráfego, em uma rede estocástica, trabalha-se com a distribuição probabilística do padrão de tráfego, entretanto, em um projeto robusto somente é conhecido as dimensões do tráfego, e usam-se leis de probabilidade pois as mesmas possuem eventos não determinísticos (GOSELIN, COURANT *et al.*, 2017).

Figura 6 - Hierarquia geográfica da rede



Fonte: Adaptado de SIMMONS (2014).

Neste contexto, o planejamento do projeto robusto de uma rede enfatiza a determinação estratégica ótima para alocar e fluir toda a demanda de tráfego. Esse planejamento pode ser feito por dois modos, a primeira, aprecia a experiência do projetista e a segunda, o projeto estratégico conta com algoritmos que tem a primícias de sistema de apoio a tomada de decisão. As metaheurísticas são algoritmos inspiradas na natureza ou em processos biológicos evolucionários, que estão sempre sujeitos a mudanças de ambientes. Dentro do conjunto de

metaheurísticas, as bioinspiradas baseadas em inteligência de enxame tem tido grande crescimento no campo da pesquisa e aplicação, por causa da sua flexibilidade de programação e sua adaptação em algoritmos híbridos. Na Tabela 1, encontra-se as técnicas dos algoritmos bioinspirados baseados em inteligência de enxame, mais usados, e suas respectivas referências de características chaves.

Tabela 1 - Metaheurísticas bioinspiradas baseadas em inteligência de enxame

TECNOLOGIA	ARTIGO
ACO	(DORIGO, 2006) (TRIAY E CERVELLÓ-PASTOR, 2010)
ABC	(KARABOGA) (GOSCIEN E LOZANO, 2018)
BFO	(PASSINO, 2002)
BCO	(YANG, CUI, <i>et al.</i> , 2013)
WSA	(TANG, FONG, <i>et al.</i> , 2012) (AGBEHADJI, FONG e MILLHAM, 2016)
CSO	(CHU e TSAI, 2007) (CHU e BAHRAMI, 2018)
FA	(YANG, 2013)
PSO	(KENNEDY, 1995) (YANMIN, 2019)
CS	(YANG e SUASH, 2009), (PAVLYUKEVICH, 2007) (GANDOMI, YANG e ALAVI, 2013)

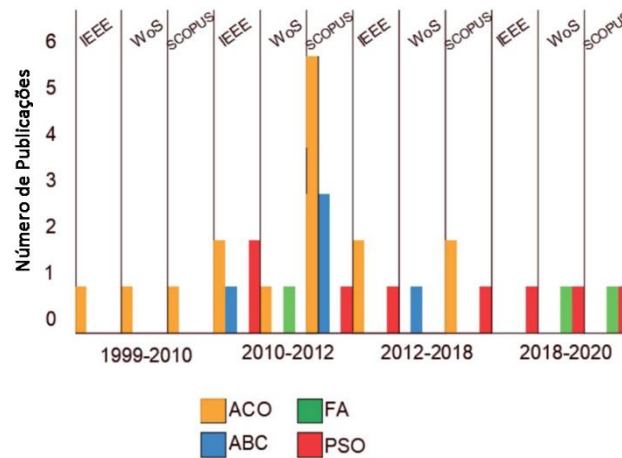
Fonte: Próprio autor

4. Metaheurísticas em Sistemas de Telecomunicações

Em sistemas de telecomunicações, o crescimento de algoritmos bioinspirados baseados em inteligência de enxame tem sido significativo (Figura 3). Com destaque aos algoritmos ACO e PSO que apresentaram um número de publicações de 13 e 8 respectivamente, entre os anos de 2010 até 2020. Observa-se que ABC e FA tem o número de publicações relativamente pequenos em comparação com ACO e PSO, porém, analisando as datas de seu desenvolvimento, o ACO tem tido crescimento entre os períodos de 2010 até 2018, em 2020 os números começam a cair e o FA têm mais publicações em 2020.

Os algoritmos CSO, WSA, BFO e CS não apresentaram publicações nas três bases de dados consultadas. Em problemas de sistemas de telecomunicações em geral, como visto na Figura 3, o número de publicações é relativamente pequeno em comparação com os demais. Dos nove algoritmos revisados e citados na Tabela 1, apenas quatro apresentaram publicações de suas aplicações em otimização do projeto de rede de fibra óptica (Figura 7).

Figura 7 - Algoritmos aplicados na otimização do projeto de redes de fibra óptica



Fonte: Próprio autor

O planejamento de rede de fibra óptica é de natureza discreta e combinatória, logo algoritmos que originalmente são feitos para serem utilizados em problemas de otimização contínuos, precisam passar por adaptações para que possam ser aplicados em problemas de otimização discretos, isso implica um grande grau de complexidade em sua aplicação.

A Tabela 2 apresenta uma revisão histórica dos artigos mais importantes encontrados nos artigos revisados, que representa uma divisão em duas fases: i) O uso de heurísticas, com grande destaque para o uso do algoritmo *Greedy*, que por anos foi utilizado para otimizar redes na camada “metropolitana”, ou seja, rede de pequeno porte; ii) o uso de metaheurística, que após o seu desenvolvimento, fez com que o uso de heurísticas diminuísse e quase cessasse, pois a vantagem da metaheurística em relação a heurística, nesse problema de interesse, é a possibilidade de simular redes de maiores porte, ou seja, rede pertencente ao nível *backbone*.

Tabela 2 - Uma visão geral histórica das publicações mais importantes relacionadas à tecnologia utilizada

ANO	ARTIGO	TECNOLOGIA PROPOSTA
1990 - 2005	(BANNISTER, FRATTA e GERLA, 1990), (YENER e BOULT, 1994), (LABOURDETTE e ACAMPORA, 1991), (ZHANG e ACAMPORA, 1995), (BANERJEE e MUKHERJEE, 1993), (BANERJEE, MUKHERJEE e SARKAR, 1994), (GANZ e WANG, 1994), (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 1996), (MUKHERJEE, BANERJEE, <i>et al.</i> , 1996), (BANERJEE e MUKHERJEE, 2000), (BANERJEE, YOO e CHEN, 1997), (LEONARDI, MELLIA e MARSAN, 2000), (MUKHERJEE, BANERJEE, <i>et al.</i> , 1996), (MELLIA, NUCCI, <i>et al.</i> , 2001), (KRISHNASWAMY, 2001) e (KONDA e CHOW, 2001)	Heurística
2005- 2020	(PAPAGIANNI, 2008), (TRIAY e CERVELLO, 2010), (BÁEZ - DIAZ, ROA-PINTO e LUCKEN, 2013), (DASGUPTA, BISWAS e BHAR, 2012), (EIRA, SANTOS e PIRES, 2014), (DIN, 2015), (YANG, CHIEN e TING, 2015), (RUBIO, VEJA e GONZÁLES, 2014), (HARUANA, JINNO e NISHIO, 2015), (WANG, CAO e PAN, 2011), (DIN, 2017), (FERNANDEZ, JUAN e TERREN, 2018), (MATA e AL., 2018) e (DEOLIVEIRA, DESOUZA e VIERIA, 2020)	Metaheurística

Fonte: Próprio autor

A Tabela 3 contém artigos publicados nos últimos dez anos e seus respectivos algoritmos metaheurísticos. O algoritmo evolucionário genético (GA), é usado como base para análise de performance de algoritmos mais recentes e até no desenvolvimento e no auxílio de algoritmos híbridos.

Tabela 3 - Problemas de otimização no projeto de redes óptica

ARTIGO	TIPO DO DOCUMENTO	BIOINSPIRADO
(BÁEZ - DIAZ, ROA-PINTO e LUCKEN, 2013), (DASGUPTA, BISWAS e BHAR, 2012)	Congresso	GA
(EIRA, SANTOS e PIRES, 2014), (DIN, 2017), (DIN, 2015)	Periódico	
(FERNANDEZ, JUAN, <i>et al.</i> , 2018), (MATA e AL., 2018)	Periódico	ENXAME
(YANG, CHIEN e TING, 2015)	Livro	ENXAME
(PAPAGIANNI, 2008)	Congresso	PSO
(TRIAY e CERVELLO, 2010), (SASI KALA RANI, RENUGA DEVI e SUGANTHI, 2016)	Periódico	ACO
(RUBIO, VEJA e GONZÁLES, 2014)	Periódico	FA
(HARUANA, JINNO e NISHIO, 2015)	Congresso	FA
(DEOLIVEIRA, DESOUZA e VIERIA, 2020)	Periódico	HÍBRIDO

Fonte: Próprio autor

Os autores que possuem maior número de publicações sobre metaheurística e/ou heurística no período 1990 a 2020 estão mostrados na Tabela 4. Dos artigos que foram revisados nenhum dos autores possuem mais de cinco publicações e alguns deles escreveram juntos.

Tabela 4 - Distribuição de publicações com base em autores que possuem maior número de publicações dos trabalhos revisados

AUTOR	NÚMERO DE PUBLICAÇÕES	TIPO DO DOCUMENTO
A.S. Acampora	2	Periódicos (LABOURDETTE e ACAMPORA, 1991) (ZHANG e ACAMPORA, 1995)
B. Mukherjee	5	Periódicos (BANERJEE e MUKHERJEE, 1993) (BANERJEE, MUKHERJEE e SARKAR, 1994) (MUKHERJEE, BANERJEE, <i>et al.</i> , 1996) (BANERJEE e MUKHERJEE, 2000) e 1 Livro (MUKHERJEE, 1997)
D. Banerjee	2	Periódicos (MUKHERJEE, BANERJEE, <i>et al.</i> , 1996) (BANERJEE e MUKHERJEE, 2000)
S. Banerjee	3	1 Congresso (BANERJEE e MUKHERJEE, 1993) e 2 Periódicos (BANERJEE, MUKHERJEE e SARKAR, 1994) (BANERJEE, YOO e CHEN, 1997)
X. S. Yang	4	Livros (YANG, CUI, <i>et al.</i> , 2013) (YANG, 2013) (YANG, CHIEN e TING, 2015) Congresso (TANG, FONG, <i>et al.</i> , 2012)
D. Din	2	Periódicos (DIN, 2015) (DIN, 2017)
M. A. DeSouza	2	Congresso (DESOUSA, DEOLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2014) e Periódico (DEOLIVEIRA, DESOUSA e VIERIA, 2020)
B. DeOliveira	2	Congresso (DESOUSA, DEOLIVEIRA, <i>et al.</i> , 2014) e Periódico (DEOLIVEIRA, DESOUSA e VIERIA, 2020)

Fonte: Próprio autor

5. Análise da Complexidade do Problema e Lacunas de Pesquisa

A formulação do problema é um dos principais desafios quando se aplica algoritmos para otimizar o projeto de redes de fibra óptica, pois precisa-se estabelecer um padrão de conectividade entre dois pontos (nós) e assim determinar formulações não lineares com variáveis contínuas e discretas e que satisfaçam um conjunto de restrições. Para que uma determinada demanda saia de um nó (fonte) e chegue até outro nó (destino) contido no conjunto de arcos, utiliza-se algumas modelagens matemáticas como *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) quando o problema possuir variáveis contínuas e discretas e *Integer Linear Programming* (ILP) quando as variáveis assumem somente valores inteiros (BAZARAA, JARVIS e. SHERALI, 2010). Dos artigos revisados a divisão do uso de cada modelagem para a formulação está na Tabela 5.

Tabela 5. Técnica de formulação para o problema de otimização

ARTIGO	TÉCNICA DE FORMULAÇÃO
(BANERJEE, YOO e CHEN, 1997), (BANERJEE e MUKHERJEE, 2000) e (WANG, CAO e PAN, 2011)	<i>Integer Linear Programming</i> (ILP)
(BANNISTER, FRATTA e GERLA, 1990), (YENER e BOULT, 1994), (LABOURDETTE e ACAMPORA, 1991), (ZHANG e ACAMPORA, 1995), (BANERJEE e MUKHERJEE, 1993), (BANERJEE, MUKHERJEE e SARKAR, 1994) e (GANZ e WANG, 1994), (RAMASWAMI e SIVARAJAN, 1996), (MUKHERJEE, BANERJEE, <i>et al.</i> , 1996), (LEONARDI, MELLIA e MARSAN, 2000), (MELLIA, NUCCI, <i>et al.</i> , 2001), (KRISHNASWAMY, 2001), (EIRA, SANTOS e PIRES, 2014), (DIN, 2015) e (DEOLIVEIRA, DESOUSA e VIERIA, 2020)	<i>Mixed Integer Linear Programming</i> (MILP)

Fonte: Próprio autor

Outro desafio importante corresponde à matriz de tráfego e a matriz de distância dos nós, que são dados obtidos previamente a produção do algoritmo de otimização. O problema deve ser

então modelado conforme a necessidade da rede pois algumas características são de difícil parametrização, como por exemplo, a maximização do fluxo de tráfego, como pode ser observado em (LABOURDETTE e ACAMPORA, 1991), (BANERJEE e MUKHERJEE, 2000).

Algoritmos que são baseados na adoção de uma topologia lógica pré-estabelecida e na otimização de nós, de acordo com o padrão de tráfego, são destacados em (BANERJEE e MUKHERJEE, 1993) e (GANZ e WANG, 1994). Vale ressaltar que quando se tem uma topologia de rede pré-estabelecida o esforço computacional exigido é considerável, pois os algoritmos levam muito tempo para o processamento de explorar o espaço de estados, e se a rede for de grande porte o algoritmo acaba sendo robusto e complexo. Dessa maneira, para cada topologia de rede gerada é analisada o fluxo de tráfego, condicionando se a rede é factível ou não, para então eleger uma solução ótima ou próxima de ótima.

Em casos onde o espaço de busca por soluções é muito grande são utilizados métodos como aprendizagem estatística ou aprendizagem de máquina como ferramenta. Estas técnicas podem utilizar dados provenientes de sistemas de monitoramento das comunicações ópticas como dados de entrada (GHAHRAMANI, 2015), (K.P., MURPHY, 2012.).

Uma rede mal dimensionada pode gerar custos desnecessários, como por exemplo, grandes enlaces de fibra acarretaria em uso de fibra compensadora de dispersão, amplificadores, regeneradores, emendas, etc. Esses fatores também podem causar ruídos afetando a qualidade do sinal transmitido. Os artigos levaram em conta somente a fibra óptica, são necessários algoritmos que considerem os demais itens que compõem uma rede para que ela apresente o menor uso possível desses equipamentos, produzindo uma rede de custo reduzido e qualidade mínima de sinal garantido.

Os artigos revisados ofereceram sistema de apoio a tomada de decisão para engenheiros e pesquisadores encontrar um *design* de rede que traga menos custo de implantação, com folga suficiente para um possível aumento de demanda de clientes na rede, e com tempo de processamento reduzido, oferecendo um aumento de produtividade desses engenheiros e pesquisadores.

6. Conclusão

O artigo apresentou uma revisão sobre a otimização do projeto de rede de fibra óptica e pontuou alguns quesitos como metodologias utilizadas e principais complexidades encontradas. A partir da revisão de literatura, pode-se concluir que, algoritmos que foram desenvolvidos para serem

usados em problemas contínuos deviam passar por adaptações para ser usados na otimização da rede óptica, devido a característica chave da rede ser combinatória (discreta). Conforme o uso de metaheurística foi aumentando no processo de otimização, foi aumentando o tamanho de rede que era otimizada chegando a atingir a camada *backbone* de rede, levando menos tempo de processamento. A maioria dos algoritmos heurísticos propostos foram aplicados em redes caracterizadas como metropolitana devido ao seu número pequeno de nós, entre 8-16. Para uma rede com número maior de nós (32), os algoritmos metaheurísticos acabaram sendo mais utilizados.

A partir da revisão de literatura, algumas tecnologias de inteligência artificial que ainda não foram usadas, poderiam ser utilizadas nesse problema de interesse, como por exemplo *machine learn*, algoritmos híbridos, etc. Pois com o aumento emergente do sistema de telecomunicação descentralizado, é necessário ter aspectos mais dinâmicos e incertos.

7. Agradecimentos

A equipe de pesquisa agradece o financiamento pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

Anatel. < <https://www.gov.br/anatel/pt-br/dados/infraestrutura/mapeamento-de-redes> >. Acesso em 04 de fev. 2021].

AGBEHADJI, I. E.; FONG, S.; MILLHAM, R. Wolf Search Algorithm for Numeric Association Rule Mining. **2016 IEEE International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis**, 2016.

ALSHARIF, M. H. et al. Six Generation (6G) wireless network: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions.. **Symmetry**, v. 12, n. 676, 2020.

BANERJEE, D.; MUKHERJEE, B. Wavelength-routed optical networks: linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 8, n. 5, p. 598-607, 2000.

BANERJEE, S.; MUKHERJEE, B. Algorithms for optimized node arrangements in ShuffleNet based multihop lightwave networks. **IEEE INFOCOM '93 The Conference on Computer Communications**, v. 2, p. 557-564, 1993.

BANNISTER, J. A.; FRATTA, L.; GERLA, M. Topological design of the wavelength-division optical network. **IEEE INFOCOM '90: Ninth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications**, 1990. 1005-1013.

BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear Programming and Network Flows**. New York: Wiley, 2010.

BRODKIN, J. ARS Technica , 18 set. 2019. Disponível em: <<https://arstechnica.com/tech-policy/2019/09/50-of-us-homes-still-wont-have-fiber-broadband-by-2025-study-says/>>. Acesso em: 29 mar. 2021.

CHU, S. C.; TSAI, P. W. Computational intelligence based on the behavior of cats. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control** , 2007. 163-173.

CHU, X.; BAHRAMI, M. Cat Swarm Optimization (CSO) Algorithm. In: _____ **Advanced Optimization by Nature- Inspired Algorithms**. [S.l.]: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018.

CRUZ, P. P. et al. **A practical Approach to Metaheuristic using LabVIEW and MATLAB**. [S.l.]: A CHAPMAN & HALL BOOK, 2020.

DASGUPTA, M.; BISWAS, G. P.; BHAR, C. Optimizaton of multiple objectives and topological design of data networks using genetic algorithm. **in Proc. Int. Conf. Recent Adv. Inf. Technol.**, 2012. 256-262.

DEOLIVEIRA, B. Q.; DESOUSA, M. A.; VIERIA, F. H. A Hybrid Firefly-Genetic Algorithm for Planning of Optical Transport Networks. **Journal Of Communication and Information Systems**, v. 35, n. 1, p. 243-255, 2020.

DESOUSA, M. et al. Modelagem de um sistema de apoio à decisão para a seleção de serviços de telecomunicações. **Conferência Ibero-Americana Computação Aplicada, Porto-Portugal**, 2014.

DIAZ-BAEZ, B.; PINTO-ROA, D. P.; VON LUCKEN, C. Robust network design under uncertain traffic an approach based on genetic algorithm. **in Proc. Latin Amer. Comput Conf.**, 2013. 1-8.

DIN, D. Genetic algorithm for virtual topology design on MLR WDM networks. **Optical Switching and Networking**, v. 18, p. 20-34, 2015.

DIN, D. Heuristic and Genetic Algorithms for Solving the Virtual Topology Design Problem on Elastic Optical Networks. **ournal of Information Science & Engineering**, v. 33, 2017.

DORIGO, M. A. S. T. Ant Colony Optimization. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, 2006.

EIRA, A.; SANTOS, J.; PIRES, J. Multi-objective Design Survivable Flexible- Grid DWDM Networks. **J. OPT. COMMUN. NETW**, v. 6, n. 3, 2014.

FERNANDEZ, S. A. et al. Metaheuristics in Telecommunication Systems: Network Design, Routing, and Allocation Problems. **IEEE Systems Journal**, v. 12, p. 3948-3957, 2018.

GANDOMI, A. H.; YANG, X.; ALAVI, A. H. cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems. **Engineering with Computers** 29, 2013. 17-35.

GANZ, A.; WANG, X. Efficient algorithm for virtual topology design in multihop lightwave networks. **EEE/ACM Transactions on Networking**, v. 2, n. 3, p. 217-225, 1994.

GHAHRAMANI, Z. Probabilistic machine learning and artificial intelligence. **Nature**, 28 May 2015. 521(7553):452-9. doi: 10.1038/nature14541. PMID: 26017444.

GOSCIEN, R.; LOZANO, M. Artificial Bee Colony for Optimization of Cloud-Ready and Survivable Elastic Optical Networks. **Computer Communications** , 2018.

GOSELIN, S. et al. Application of probabilistic modeling and machine learning to the diagnosis of FTTH GPON networks. **2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)**, 2017. 1-3.

HARUANA, M.; JINNO, M.; NISHIO, Y. Application of Firefly Algorithm to Optimization of Translucent Elastic Optical Network. **Proc. of Nonlinear Theory and its Applications Conference**, 2015.

International communication union. <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709/>>Acesso em: 04 de jan. de 2021.

K.P.MURPHY. **Machine Learning: a Probabilistic Perspective**. [S.l.]: The MIT Press, 2012.

KARABOGA, D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. **Technical Report - TR06. Technical Report, Erciyes University**.

KENNEDY, J. . E. R. C. Particle swarm optimisation. **Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks**, 1995. 1942-1948.

KONDA, V. R.; CHOW, T. Y. Algorithm for traffic grooming in optical networks to minimize the number of transceivers. **2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (IEEE Cat. No.01TH8552)**, 2001. 218-221.

KRISHNASWAMY, R. M. . S. K. N. Design of logical topologies: a linear formulation for wavelength-routed optical networks with no wavelength changers. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 9, n. 2, p. 186-198, 2001.

LABOURDETTE, J. -. P.; ACAMPORA, A. S. Logically rearrangeable multihop lightwave networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 39, n. 8, p. 1223-1230, 1991.

MATA, J.; AL., E. Artificial Intelligence (AI) Methods in Optical Networks: A Comprehensive Survey. **Optical Switching and Networking**, v. 28, p. 43-47, 2018.

MELLIA, M. et al. Optimal Design of Logical Topologies in Wavelength-Routed Optical Networks With Multicast Traffic. **GLOBECOM'01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270)**, 2001. 1520-1525.

MUKHERJEE, B. **Optical Communication Networks**. New York: McGraw Hill , 1997.

MUKHERJEE, B. et al. Some principles for designing a wide-area WDM optical network. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 4, n. 5, p. 684-696, 1996.

PAPAGIANNI, C. E. A. Communication Network Design Using Particle Swarm Optimization. **IEEE International Multiconference on Computer Science and Information Technology**, 2008. 915-920.

PASSINO, K. M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. **IEEE Control Systems**, v. 22(3), p. 52-67, 2002.

PAVLYUKEVICH, I. Levy Flights, non-local Search and Simulated Annealing. **Journal of Computational Physics**, v. 226, p. 1830-1844, 2007.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 14, n. 5, p. 840-851, 1996.

RUBIO, A.; VEJA, M. A.; GONZÁLES, D. L. An Improved Multiobjective Approach Inspired by the Flashing Behavior of Fireflies for Traffic Grooming in Optical WDM Networks. **Applied Soft Computing**, p. 617-636, 2014.

SASI KALA RANI, K.; RENUGA DEVI, A.; SUGANTHI, J. Optimization of Disjoints Using WDM-PON in an Optical Network. **Circuits and Systems**, v. 7, n. 9, 2016.

SHIMADA, S.; KOYAMA, M. Optical Fiber Communication Systems in Japan. **1981 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest**, 1981. 198-200.

SIMMONS, J. M. **Optical Network Design and Planning**. [S.l.]: Springer, 2014.

TANG, R. et al. Wolf search algorithm with ephemeral memory. **Digital Information Management (ICDIM)**, 22-24 Aug. 2012.

TRIAI, J.; CERVELLÓ-PASTOR, C. An Ant-Based Algorithm for Distributed Routing and Wavelength Assignment in Dynamic Optical Networks. **IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS**, v. 28, n. 4, p. 542-552, 2010.

WANG, Y.; CAO, X.; PAN, Y. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced Elastic Optical Path networks. **2011 Proceedings IEEE INFOCOM**, 2011. 1503-1511.

YANG, X. S. **Cuckoo Search and Firefly Algorithm: Theory and Applications**. [S.l.]: Springer , 2013.

YANG, X. S. et al. **Swarm Intelligence and Bio- Inspired**. [S.l.]: Elsevier , 2013.

YANG, X. S.; CHIEN, S. F.; TING, T. O. **Bio- inspired Computation in Telecommunications**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2015.

YANG, X.-S.; SUASH, D. Cuckoo Search via Lévy Flights. **Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009)**, 2009. 210-214.

YANMIN, W. Research of improved particle swarm optimization algorithm based on big data. **2019 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)**, 2019.

YENER, B.; BOULT, T. E. A study of upper and lower bounds for minimum congestion routing in lightwave networks. **roceedings of INFOCOM '94 Conference on Computer Communications**, 1994. 138-147.