

Metaheurísticas em sistemas de telecomunicações: problemas de design, roteamento e alocação de rede

Stephanie Alvarez Fernandez, Angel A. Juan, Jérica de Armas Adrián, Daniel Guerreiro e Silva,
e Daniel Riera Terrén

Resumo—Recentes avanços na indústria de telecomunicações

oferecem grandes oportunidades para cidadãos e organizações em um nível global mundo conectado, mas também surgem um grande número de complexos o lucro, produção, desempenho ou eficiência de alguma atividade ou desafios que os tomadores de decisão devem enfrentar. Alguns desses desafios podem ser modelados como problemas de otimização combinatória (COPs). Frequentemente, esses COPs são grandes, NP-difíceis e devem ser resolvidos em "tempo real", o que torna necessário o uso de meta-heurísticas. O primeiro objetivo deste artigo é fornecer uma revisão sobre uma quantidade considerável de tempo de computação e esforços são investidos. como as metaheurísticas têm sido utilizadas até o momento para lidar com os COPs associados aos sistemas de telecomunicações, detectando as principais tendências e desafios. Particularmente, a análise enfoca os problemas de design, roteamento e alocação de rede. Além disso, devido à natureza desses desafios, o artigo discute como a hibridização de metaheurísticas com metodologias como simulação e

o aprendizado de máquina pode ser empregado para estender os recursos de metaheurísticas na solução de COPs estocásticos e dinâmicos na indústria de telecomunicações.

Termos do Índice—Alocação de canal, metaheurísticas, rede de de-sinal, roteamento, sistemas de telecomunicações.

Eu eu NTRODUÇÃO

Os engenheiros para tomar decisões mais inteligentes a fim de melhorar os sistemas que projetam e operam. Otimização combinatória

Os problemas de integração (COPs) podem ser encontrados em qualquer lugar, desde logística e transporte até saúde, produção, finanças, cidades inteligentes e sistemas de telecomunicações. Ao resolver esses problemas, o objetivo típico é encontrar a melhor solução possível entre um conjunto geralmente vasto de combinações viáveis. Assim, por exemplo,

Artigo recebido em 3 de março de 2017; revisado em 27 de julho de 2017 e 20 de novembro de 2017; aceito em 22 de dezembro de 2017. Este trabalho foi apoiado em parte pelo Ministério da Economia e Competitividade da Espanha - FEDER (TRA2013-48180-C3-P, TRA2015-71883-REDT) e em parte pelo programa Erasmus + (2016-1-ES01 -KA108-023465). (*Autor correspondente: Stephanie Alvarez Fernandez.*)

S. Alvarez Fernandez está com IN3 – Ciência da Computação, Departamento de Multimedia and Telecommunication, Open University of Catalonia, Barcelona 08018, Espanha, e também com o Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília 70910-900, Brasil (e-mail: salvarezferna@uoc.edu).

AA Juan e D. Riera Terrén estão com IN3 - Ciência da Computação, Open Universidade da Catalunha, Barcelona 08018, Espanha (e-mail: ajuanp@uoc.edu ; drierat@uoc.edu).

J. de Armas Adrián é do Departamento de Economia e Negócios, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona 08002 Espanha (e-mail: jesica.dearmas @ upf.edu).

D. Guerreiro e Silva está no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Brasília, Brasília 70910-900, Brasil (e-mail: danielgs@ene.unb.br).

Identificador de objeto digital 10.1109 / JSYST.2017.2788053

podemos estar interessados em: 1) minimizar o custo ou consumo de energia de alguma atividade ou sistema [1] ou 2) maximizar desempenho ou eficiência de alguma atividade ou sistema [2].

COPs da vida real são geralmente NP-difíceis e de grande escala, que significa que eles não podem ser resolvidos usando métodos exatos, a menos que um

Nesses casos frequentes, as metaheurísticas revelam-se boas alternativas aos métodos exatos, pois podem encontrar soluções de alta qualidade ou mesmo quase ótimas em tempos de computação baixos [3]. Metaheurísticas são algoritmos de alto nível que coordenam heurísticas e regras simples para encontrar soluções quase ótimas para

COPs, normalmente após alguns segundos. Sendo abordagens gerais, a mesma estrutura metaheurística pode ser empregada na solução de tipos muito diferentes de COPs.

Na era da informação, os sistemas de telecomunicações estão ao nosso redor. Apresentando um número crescente de usuários, os serviços de telecomunicações trazem muitos desafios para a comunidade de pesquisa de otimização [4]. Com efeito, alguns desses desafios podem ser formulados como COPs, como no caso da frequência

problema de atribuição em redes de rádio, o problema de projeto de rede, o problema de roteamento ou a otimização de canais de alocação [5]. Uma vez que a maioria desses problemas são NP-difíceis e de grande escala, heurísticas e metaheurísticas têm sido cada vez mais usadas para lidar com eles. Frequentemente, essas abordagens metaheurísticas foram combinadas com outros métodos de computação suave, gerando algoritmos híbridos [3]. Assim, por exemplo, o problema de projeto de rede representa um dos COPs mais desafiadores na indústria de telecomunicações. Este problema está relacionado ao planejamento estratégico ou tático dos recursos da rede [6]. Projetar uma rede eficiente é uma tarefa desafiadora frequentemente encontrada em muitos aplicativos do mundo real. As decisões de design de rede também afetam outras decisões gerenciais, como localização do repositório (ou hub) e caminhos de roteamento. Nos últimos anos, um grande número de roteamento e tecnologias de projeto de rede foram desenvolvidas e atualizadas [7]. A diversidade de redes implantadas e o ritmo acelerado das mudanças tecnológicas aumentam a necessidade de novas abordagens de otimização que apoiem a tomada de decisões inteligentes. Algumas das principais forças motrizes por trás desses requisitos são a necessidade de garantias de qualidade de serviço (QoS) e o crescimento explosivo no tamanho e no uso da rede. Da mesma forma, a demanda por comunicação móvel aumentou. No entanto, existe um espectro finito alocado para tais serviços, o que coloca o problema de alocação de canal em sistemas de rádio móvel [5]. A diversidade de redes implantadas e o ritmo acelerado das mudanças tecnológicas aumentam a necessidade de novas abordagens de otimização que apoiem a tomada de decisões inteligentes. Algumas das principais forças motrizes por trás desses requisitos são a necessidade de garantias de qualidade de serviço (QoS) e o crescimento explosivo no tamanho e no uso da rede. Da mesma forma, a demanda por comunicação móvel aumentou. No entanto, existe um espectro finito alocado para tais serviços, o que coloca o problema de alocação de canal em sistemas de rádio móvel [5]. A diversidade de redes implantadas e o ritmo acelerado das mudanças tecnológicas aumentam a necessidade de novas abordagens de otimização que apoiem a tomada de decisões inteligentes. Algumas das principais

TABELA I
O VERVIEW O VER O PTIMIZAÇÃO P ROBLEMS C HALLENGES
NO T ELECOMUNICAÇÕES

Otimização Problema	Desafios e Requisitos
Design de rede	1) Localização de hosts, servidores, terminais e outros nós finais 2) Tráfego projetado para a rede 3) Custos projetados para entrega de diferentes níveis de serviço 4) Limitação de recursos de hardware 5) Segurança 6) Requisitos de QoS 7) Confiabilidade e disponibilidade
Encaminhamento	1) Roteamento eficiente com infraestrutura mesh 2) Escalabilidade 3) Robustez 4) Garantia de segurança 5) Situações de sobrecarga
Alocação de canal	1) Adaptabilidade 2) Utilização do canal 3) Suporte QoS 4) Tolerância a falhas 5) Auto-con fi gurabilidade 6) Atribuições de fluxo de pacotes

Os problemas de otimização relacionados encontrados na literatura cobrem muitos tipos de redes. Uma infraestrutura de projeto de rede genérica e um método de roteamento devem garantir que os dados possam viajar pela rede entre pontos finais arbitrários. A rede resultante deve ser capaz de suportar muitos cenários, entre outros: redes pesadas e carregadas, padrões de tráfego, multicast ou tráfego ponto a ponto. O rápido crescimento da capacidade de telecomunicações - impulsionado em parte pela ampla implantação de fibra óptica, bem como pela expansão de tecnologias sem fio - levou a uma preocupação crescente com relação às características do tráfego e diferentes demandas de QoS. Além disso, o projeto de redes de comunicação e esquemas de roteamento deve garantir algum subconjunto dos seguintes requisitos:

- 1) conectividade permanente, fornecendo ao mesmo tempo a robustez, alta confiabilidade e disponibilidade exigidas;
- 2) gerenciamento eficiente de energia e outras questões com o menor custo possível;
- 3) garantia de QoS ou, pelo menos, alta probabilidade de bom atendimento;
- 4) prevenção de oscilações de roteamento, loops e situações de rede sobrecarregada.

A Tabela I oferece uma visão geral dos campos de aplicação discutidos. Como os esforços de redesenho arquitetônico são demorados e, portanto, caros, há uma necessidade crítica de abordagens eficientes para apoiar as decisões de design adequadas. Assim, o uso de algoritmos metaheurísticos é necessário na resolução de COPs na área de telecomunicações. Além disso, observe que vários processos no campo das telecomunicações estão sujeitos a incertezas, o que os torna ainda mais desafiadores para otimizar. O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta a metodologia de pesquisa e um panorama das publicações recentes. A seção III fornece um resumo das principais metaheurísticas que serão citadas neste artigo.

Journal Articles on Heuristics in Telecommunication

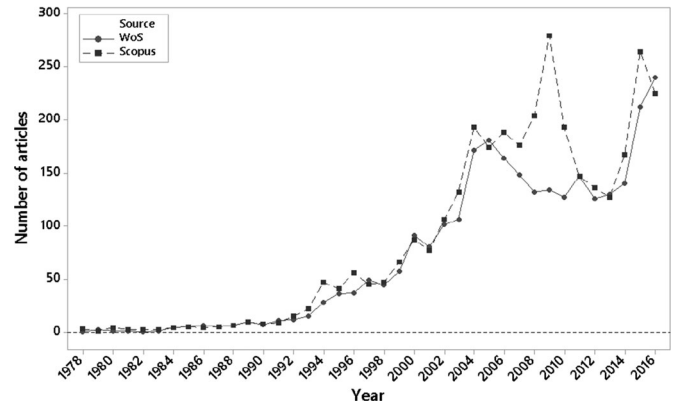


Fig. 1. Séries temporais de artigos de periódicos indexados no Scopus e no Web of science.

A Seção IV apresenta uma série de desafios relacionados ao projeto de redes de telecomunicações. Os desafios mais relevantes associados ao roteamento e outras aplicações diversas são analisados nas Seções V e VI. As tendências futuras na aplicação de metaheurísticas em sistemas de telecomunicações são analisadas na Seção VII. Finalmente, as principais conclusões deste artigo são destacadas na Seção VIII.

II. SURVEY METODOLOGIA

Os sistemas de telecomunicações da vida real estão sujeitos a um grande conjunto das condições ambientais, e muitos fatores e parâmetros podem afetar o desempenho desses sistemas. Normalmente, os processos em sistemas de telecomunicações podem ser lentos e caros. Assim, qualquer economia em termos de tempo e recursos tornará os projetos de rede mais sustentáveis. Uma questão importante a ser tratada ao selecionar o algoritmo de otimização certo para resolver um COP no campo das telecomunicações é o equilíbrio entre o desempenho do algoritmo e o tempo de computação que ele requer. Visto que existem tantos problemas de otimização no campo dos sistemas de telecomunicações, não é surpreendente que o uso de metaheurísticas tenha ganhado atenção nos últimos anos. Isso é evidenciado na Figura 1, que mostra um gráfico de série temporal do número de artigos de periódicos indexados (tanto no Scopus quanto no Web of Science) durante as últimas décadas.

Os dados da série temporal anterior foram obtidos executando um procedimento de pesquisa incluindo a seguinte condição lógica: ((* heurística) ou ("algoritmo genético") E telecomunicação). Esta condição foi aplicada ao título, resumo ou palavras-chave dos artigos pesquisados.

III. BRIEF O VERVIEW ON METAHEURISTICS

Nos últimos anos, um grande número de métodos metaheurísticos Proaches têm se tornado cada vez mais populares para lidar com COPs NP-hard. Metaheurísticas são particularmente adequadas para resolver problemas de otimização altamente complexos, incluindo muitas variáveis de decisão com interações não lineares entre elas, múltiplos objetivos e / ou restrições e estruturas mal compreendidas. Metaheurísticas podem ser classificadas em solução única

metaheurísticas, que mantêm uma solução única; metaheurísticas baseadas em população, que trabalham com um conjunto de soluções individuais; e metaheurísticas híbridas.

A. Metaheurísticas de solução única

Na área de sistemas de telecomunicações, as metaheurísticas de solução única mais frequentemente utilizadas são Tabu Search (TS), greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) e simulated annealing (SA). TS é um procedimento de busca local que também inclui uma lista “tabu” de soluções recentemente visitadas para aumentar a eficiência [8]. Ao contrário das metaheurísticas sem memória, o TS faz uso de projetos de memória flexíveis e adaptáveis. Este procedimento usa uma regra de seleção baseada no conceito de *melhor melhoria*, onde a melhor solução na vizinhança é escolhida para substituir a solução de referência atual. Este critério de aceitação permite que a busca evite ficar presa em um ótimo local, embora uma busca cíclica possa acontecer. Para evitar este comportamento indesejável, soluções recentemente visitadas são proibidas de serem visitadas durante um certo número de iterações, evitando assim caminhos cíclicos no conjunto de vizinhança. O GRASP [9] é outra metaheurística de localização única atualmente empregada na otimização de sistemas de telecomunicações. GRASP é um procedimento iterativo. Cada iteração consiste em duas fases: construção e pesquisa local. O objetivo do GRASP é amostrar repetidamente soluções estocasticamente gananciosas e, em seguida, usar uma pesquisa local para refiná-las a um ótimo local. A estratégia do procedimento é centrada em um mecanismo de construção gradual estocástico e ganancioso, que conduz a seleção dos componentes de uma solução com base em um determinado critério de classificação. SA representa outra metaheurística de solução única [10]. SA é um algoritmo estocástico que permite, em algumas condições, a degradação de uma solução de base com o objetivo de evitar mínimos locais.

Além das metaheurísticas citadas, a busca local iterada [11] é outra abordagem possível para a resolução de COPs na área de telecomunicações. Primeiro, uma pesquisa local é aplicada a uma solução inicial. Então, a cada iteração, uma perturbação dos ótimos locais obtidos é realizada. Finalmente, uma busca local é aplicada à solução perturbada.

B. Metaheurísticas de base populacional

A maioria dos algoritmos baseados em população são inspirados na natureza. Nesse contexto, a teoria da origem e diversidade da vida resultou no desenvolvimento de uma das abordagens de computação natural mais populares, os Algoritmos Evolucionários (EAs). EAs trabalham em populações de indivíduos e modelam a evolução natural, que é um processo de adaptação com o objetivo de melhorar as capacidades de sobrevivência por meio da seleção natural, reprodução, competição, mutação e simbiose. Em outras palavras, dada uma população de indivíduos, a pressão ambiental causa a seleção natural (sobrevivência do melhor teste) e, portanto, a função objetiva (aptidão) da população - que buscamos otimizar ao longo das gerações - é melhorada. Com base nessa aptidão, alguns dos melhores candidatos são escolhidos para semear a próxima geração, aplicando recombinação e / ou mutação a eles. A recombinação e mutação levam a um conjunto de novos

candidatos (a prole) que competem com os antigos por um lugar na próxima geração. O processo é repetido até que uma solução adequada seja encontrada ou um limite computacional previamente definido seja alcançado. As implementações mais comuns de EAs são algoritmos genéticos (AGs), que modelam a evolução genética [12]. Outra abordagem de computação motivada pela biologia é a inteligência de enxame (SI). O termo é usado para descrever qualquer tentativa de projetar algoritmos ou dispositivos de resolução de problemas inspirados no comportamento coletivo de organismos sociais, de colônias de insetos a sociedades humanas. SI tem duas áreas principais: algoritmos baseados no comportamento coletivo de insetos sociais - como a otimização de colônia de formigas (ACO) ou colônia de abelhas (BCO) - e algoritmos baseados em culturas de sociocognição como a otimização de enxame de partículas (PSO) [13].

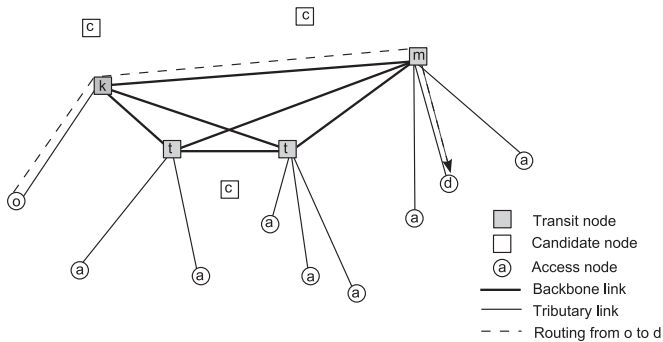
Os algoritmos inspirados na natureza são geralmente adequados para aplicações como planejamento, design, controle, classificação e agrupamento, modelagem de séries temporais, composição musical, etc. Ao contrário da maioria das técnicas de otimização, esses algoritmos mantêm uma população de soluções provisórias que são manipuladas competitivamente pela aplicação alguns operadores de variação para encontrar um ótimo global [14].

C. Metaheurísticas híbridas

Existem muitas outras alternativas, especialmente por meio da hibridização de metaheurísticas com outras metodologias. A motivação por trás da implementação de algoritmos híbridos geralmente é obter melhores abordagens de desempenho que aproveitem cada uma das estratégias individuais [15]. Na verdade, a escolha de uma combinação adequada de vários conceitos algorítmicos é muitas vezes a chave para alcançar o desempenho de ponta na solução de COPs mais difíceis. Pode-se distinguir três tipos de hibridização [16]. A primeira possibilidade consiste em introduzir conceitos ou estratégias de uma das classes de algoritmos na outra. Por exemplo, algumas metaheurísticas baseadas em população fazem uso desse tipo de hibridização, incorporando procedimentos de busca local. A segunda forma de hibridização é baseada na troca de informações de dois ou mais algoritmos que normalmente são executados em paralelo, ajudando um ao outro a cobrir a pesquisa espacial. Finalmente, a última abordagem integra metaheurísticas com métodos exatos [17], simulação [18] e até mesmo técnicas de aprendizado de máquina [19].

4. NETWORK DESIGN

Problemas de design de rede de telecomunicações ganharam atenção nas últimas décadas. A versão clássica deste problema consiste em encontrar um projeto de rede que minimize os custos totais enquanto satisfaz as demandas dos usuários, fornecendo um mínimo de QoS e respeitando as restrições de capacidade de cada link. No passado, o projeto de redes de comunicação era resolvido como um problema de otimização de objetivo único, usando o custo da rede como o objetivo a ser minimizado e considerando restrições, como confiabilidade, atraso máximo, etc [20]. No entanto, há uma tendência clara de considerar o projeto de uma rede de telecomunicações como um problema de otimização multiobjetivo. Uma arquitetura típica para tal rede consiste em redes tributárias - que conectam nós a hubs - e uma rede de backbone - que interconecta os hubs. Dependendo do aplicativo, os nós do hub são chamados por vários nomes, incluindo



portas, concentradores, interruptores, pontos de controle ou mesmo pontos de acesso [21]. Da mesma forma, as redes tributárias também são chamadas de redes locais ou de acesso, enquanto as redes de backbone podem ser chamadas às vezes de redes em nível de hub. Frequentemente, devido ao tamanho do problema, o projeto da rede backbone é considerado independente do projeto das redes tributárias. Assim, uma abordagem de solução proposta em [22] para o projeto integrado foi baseada em um algoritmo TS. Os autores lidaram com o problema de como expandir as redes de uma área metropolitana de forma econômica. O modelo proposto considerou a atualização da rede de acesso com topologia em estrela e a expansão da rede backbone com vários tipos de topologias. Os resultados demonstraram que a abordagem TS apresenta comportamento relativamente estável em termos de proximidade da solução ótima. Os resultados foram obtidos em instâncias de até 500 usuários em um período de tempo razoável. Outro COP que surge no projeto de redes de telecomunicações é o problema do anel estrela. Neste problema, o objetivo é localizar um ciclo simples através de um subconjunto de vértices de um grafo com o objetivo de minimizar o custo total de todas as conexões em uma topologia estrela em anel. Uma nova abordagem metaheurística híbrida para resolver este problema foi proposta em [23]. A abordagem combinou uma busca de vizinhança variável com um algoritmo GRASP. A metaheurística híbrida foi testada na biblioteca de problemas do caixeiro-viajante, com instâncias envolvendo entre 50 e 300 vértices. Mesmo que a topologia em estrela seja uma escolha distinta para muitos tipos de redes de acesso, existem situações em que outros layouts podem ser mais adequados, como a topologia em árvore. Em [24], Girard Outro COP que surge no projeto de redes de telecomunicações é o problema do anel estrela. Neste problema, o objetivo é localizar um ciclo simples através de um subconjunto de vértices de um grafo com o objetivo de minimizar o custo total de todas as conexões em uma topologia estrela em anel. Uma nova abordagem metaheurística híbrida para resolver este problema foi proposta em [23]. A abordagem combinou uma busca de vizinhança variável com um algoritmo GRASP. A metaheurística híbrida foi testada na biblioteca de problemas do caixeiro-viajante, com instâncias envolvendo entre 50 e 300 vértices. Mesmo que a topologia em estrela seja uma escolha distinta para muitos tipos de redes de acesso, existem situações em que outros layouts podem ser mais adequados, como a topologia em árvore. Em [24], Girard o objetivo é localizar um ciclo simples através de um subconjunto de vértices de um grafo com o objetivo de minimizar o custo total de todas as conexões em uma topologia em estrela em anel. Uma nova abordagem metaheurística híbrida para resolver este problema foi proposta em [23]. A abordagem combinou uma busca de vizinhança variável com ou seja, uma rede na qual o tráfego coletado pelos nós de acesso deve ser roteado por uma rede de backbone, cujos nós são chamados de nós de trânsito. Para resolver o problema, os autores propuseram um algoritmo baseado em TS.

A importância das redes de telecomunicações aumentou dramaticamente nos últimos anos. As redes de hoje exigem uma quantia significativa de investimento para garantir QoS e desempenho. O projeto e o planejamento da rede em sistemas de engenharia requerem decisões políticas, análises de estratégias de investimento e planos de desenvolvimento técnico. O problema de otimização de rede multinível é um modelo de projeto de rede que levanta aspectos de otimização de dimensão, projeto topológico e localização da instalação. Problemas de otimização de rede multinível aparecem em muitos contextos, como sistemas de telecomunicações, logística, transporte e energia elétrica. Flores *et al.* em [26] propôs versões assíncronas paralelas de promissores EAs multiobjetivos, com o objetivo de projetar uma rede de telecomunicações ótima na presença de múltiplos objetivos conflitantes como custo e desempenho.

O problema de projeto topológico é NP-difícil e, portanto, é torna-se intratável usando métodos exatos conforme o número de nós aumenta. Com o surgimento de alguns aplicativos - como teleconferência, simulação interativa ou sistemas de conteúdo distribuído e multijogos - o número de pessoas que exigem serviços multicast está crescendo. A comunicação multicast refere-se à entrega de informações a vários receptores simultaneamente. Essas informações podem vir apenas de uma fonte (multicast um-para-muitos) ou também de muitas fontes (multicast muitos-para-muitos). Existem várias aplicações potenciais de multicast, por exemplo, entrega de notícias, distribuição de cotações de ações, atualizações de software, streaming de áudio e vídeo, etc. Em [27], Li e Pan formulou este problema e então o resolveu usando um GA paralelo. Em seus experimentos computacionais, o algoritmo foi testado em uma rede com 25 nós. A solução baseada em GA pode gerar um custo de link mais baixo para alcançar multicast. Uma questão relacionada ao multicast é como fornecer um serviço confiável. O provisionamento de serviço multicast confiável trata de como lidar com retransmissões de pacotes. Em [28], Santos *et al.* focado no método de replicação de servidor, em que os dados são replicados sobre um subconjunto dos hosts de retransmissão com capacidade para multicast e solicitação de retransmissão de receptores que são tratados pelo servidor replicado mais próximo. Eles propuseram uma metaheurística híbrida para encontrar soluções quase ótimas para este problema. Os experimentos foram realizados em cenários multicast.

Como alternativa de conectar cada par de nós de demanda com uma conexão direta, uma topologia hub-and-spoke é usada em várias redes. Nesse tipo de rede, a comunicação direta entre pares de nós de demanda costuma ser cara. O fluxo de informações, mercadorias ou passageiros de diferentes origens pode ser obtido nos nós centrais antes da transmissão ao seu destino. O projeto de redes hub-and-spoke também é conhecido por ser um problema NP-difícil e recentemente foi abordado por abordagens baseadas em metaheurísticas. Assim, em [29] um híbrido GA com TS é proposto. O GA determina o número e a localização dos hubs, enquanto o TS aloca nós não-hub aos hubs instalados. Da mesma forma, [30] propôs um GA e foi eficiente para o projeto de hub-and-spoke com alocação única, onde a criação da população inicial é baseada em uma metaheurística GRASP. Em [31], um problema de hub de alocação assimétrica capacitada foi considerado. A abordagem determinou o número de hubs, sua localização e a alocação assimétrica de nós não hubs para hub com o objetivo de minimizar o transporte total

custos enquanto satisfaz o nível de serviço exigido. O método de solução proposto é baseado na combinação de ACO com GA.

Além disso, as redes podem ficar parcialmente desconectadas devido a falhas catastróficas de componentes, e é importante que os usuários da rede possam acessar alguns serviços da rede mesmo sob tais circunstâncias. A disponibilidade de serviços de rede pode ser aumentada alocando servidores estrategicamente em uma rede. Nesse sentido, [32] desenvolveu uma nova abordagem de simulação-otimização combinando simulação Monte Carlo com PSO para resolver o problema de atribuição de servidor confiável. A abordagem proposta foi testada usando problemas aleatórios variando de 30 a 100 nós. Em seguida, os mesmos autores definiram esses problemas determinando uma implantação de servidores idênticos para maximizar uma medida de disponibilidade de serviço e resolveram usando abordagens metaheurísticas inspiradas na natureza, como ACO e PSO [33]. O problema de atribuição confiável de servidores em redes foi abordado por um número limitado de trabalhos apresentados na literatura. Isso está intimamente relacionado ao p - problema mediano [34], e está preocupado com a localização p servidores idênticos em p nós distintos de uma rede para minimizar a distância total ponderada entre os nós e os servidores mais próximos. A maioria dos problemas de confiabilidade de rede são NP-difíceis e, por causa de sua dificuldade, o p - O problema da mediana foi geralmente estudado sob suposições simplificadoras. Recentemente, [35] introduziu o problema de atribuição de servidor confiável considerando ataques, que busca escolher a localização dos servidores em uma rede a fim de maximizar a confiabilidade da rede que resulta de um ataque de pior caso nas bordas da rede. Eles introduziram um GA que incorpora a estrutura teórica do jogo do problema no algoritmo.

Além disso, as operadoras de serviços de telecomunicações estão aumentando seus investimentos na solução do problema de projeto de rede para lidar com qualquer requisito de tráfego sob certos limites e condições físicas da rede. Em [36], Diaz-Baez *et al.* propôs um GA para projetar redes robustas com capacidade ótima de enlaces, considerando um roteamento estável com tráfego incerto que pode ser dividido em k sub-rotinas. No entanto, aumentando o k valor implica um aumento no número de soluções viáveis. Assim, uma troca entre k e foi detectada a qualidade das soluções obtidas pelo algoritmo proposto. Da mesma forma, dada a importância e complexidade do problema de projeto de rede robusta, Arteta e Pinto-Roa em [37] estudaram o tema do projeto de rede robusta para garantir certo nível de QoS. Ao reservar uma largura de banda ajustável para cada nó, a rede não é influenciada negativamente pelo tráfego do resto da rede. Assim, um EA multiobjetivo foi proposto para resolver e encontrar um projeto de rede robusto, que também minimiza o custo da rede, minimiza a desigualdade de tráfego e maximiza o serviço de tráfego no pior cenário.

A pressão para reduzir custos também está adicionando uma nova urgência à busca de projetos práticos de rede de comunicação e algoritmos de otimização que possam embalar o tráfego em menos instalações ou menos caras, sem exigir nova tecnologia ou compras de capital. Assim, Cox e Sanchez [38] apresentaram em seu trabalho um novo algoritmo metaheurístico baseado em uma abordagem de curto prazo de TS para projetar redes de telecomunicações de menor custo que transportam tráfego de local de celular para switches sem fio, enquanto atendem às restrições de capacidade, capacidade e compatibilidade técnica. Além disso, muitos

TABELA II
METAHEURÍSTICAS UMA APLICADO A NETWORK DESIGN OPTIMIZATION PROBLEMS

Artigo	Problema de Otimização	Solução Única	Populacional
[22]	Projeto de topologia	TS	
[23]	Projeto de topologia	ENTENDER	
[24]	Projeto de topologia	TS	
[25]	Problema de localização do hub	TS	
[26]	Projeto de rede ideal		EA
[27]	Projeto de topologia de codificação		GA
[28]	Rede multicast confiável	ENTENDER	
[30]	Problema de localização do hub		GA
[31]	Problema de localização do hub		GA
[32]	Atribuição de servidor confiável		PSO
[33]	Atribuição de servidor confiável		PSO
[35]	Atribuição de servidor confiável		GA
[36]	Design robusto		GA
[37]	Design robusto		EA
[38]	Projetar rede de menor custo	TS	
[39]	Projeto de topologia		PSO
[40]	Projeto de topologia		GA

trabalhos de pesquisa foram feitos para otimizar o atraso médio da rede e, assim, projetar redes confiáveis de custo mínimo ou redes econômicas de máxima confiabilidade. Um algoritmo PSO híbrido foi implementado em [39] para projetar uma infraestrutura de rede incluindo decisões sobre os locais e tamanhos dos links. Os resultados indicaram uma melhora no processo de otimização em comparação aos AGs. Em [40], Dasgupta *et al.*

propôs uma modelagem de redes de dados com taxa de atraso e perda de pacotes. Eles minimizaram o custo da rede usando um GA. Para isso, foram definidas três funções objetivo.

A Tabela II resume os principais artigos que propuseram metaheurísticas aplicadas a problemas de projeto de redes em telecomunicações. Observe que TS é a metaheurística de busca de solução única mais popular para abordar problemas de projeto de rede. Em geral, entretanto, metaheurísticas de base populacional, especialmente AGs, são as metodologias mais empregadas.

V. R SAÍDA

Nas últimas décadas, vimos mudanças dramáticas no indústria de telecomunicações que têm implicações de longo alcance em nosso estilo de vida. Existem muitos motivadores para essas mudanças: Há uma necessidade contínua e implacável de mais capacidade na rede e, ao mesmo tempo, as empresas hoje dependem de redes de alta velocidade para conduzir seus negócios. Não muitos anos atrás, as tecnologias de fio e rádio eram as escolhas para enviar mensagens de forma eficaz. Hoje, a fibra óptica tem substituído os fios em muitas aplicações e, com o wireless, está emergindo como uma das tecnologias de transmissão dominantes. Os fatores acima mencionados impulsionaram o desenvolvimento de redes de fibra óptica de alta capacidade e sua transição extraordinariamente rápida dos laboratórios de pesquisa para a implantação comercial. As redes de fibra óptica oferecem a promessa de resolver muitos dos problemas que mencionamos. Além de fornecer enormes capacidades de rede, uma rede de fibra óptica fornece uma infraestrutura comum através da qual uma variedade de serviços podem ser entregues. Na primeira geração dessas redes, a fibra óptica era usada essencialmente para transmissão e simplesmente para fornecer capacidade.

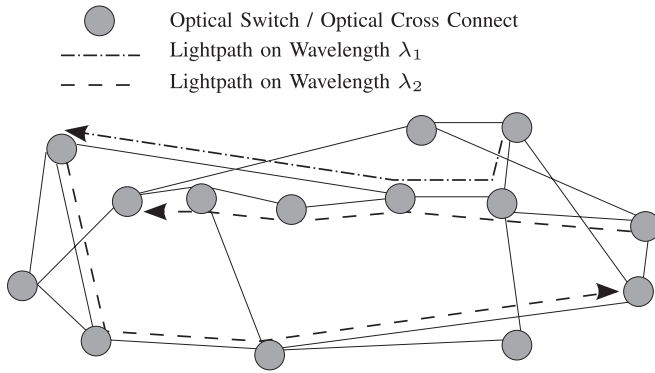


Fig. 3. Rede WDM óptica com roteamento por comprimento de onda e conexões por caminho de luz [45].

A segunda geração de redes de fibra óptica também possui recursos de roteamento e chaveamento, bem como inteligência na camada óptica [41]. Em ambas as gerações, as técnicas de multiplexação fornecem um aumento na capacidade de transmissão. A necessidade de multiplexação é motivada pelo fato de que, na maioria das aplicações, é muito mais barato transmitir dados em taxas mais altas em uma única fibra do que transmitir em taxas mais baixas em várias fibras. Existem basicamente duas maneiras de aumentar a capacidade de transmissão em uma fibra: a multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) e a multiplexação por divisão de tempo. A ideia do WDM é transmitir dados simultaneamente em vários comprimentos de onda da portadora (ou, equivalentemente, frequências ou cores) sobre uma fibra. Em uma rede WDM roteada por comprimento de onda, os usuários finais se comunicam uns com os outros por meio de canais WDM totalmente ópticos, que são referidos como caminhos de luz [42]. Um caminho de luz é visto como uma conexão de luz ponto a ponto de uma fonte ao seu destino. O conceito de caminho de luz pode ser estendido a uma árvore de luz, onde uma conexão ponto-a-multiponto é configurada usando um único ou múltiplos comprimentos de onda [43]. Em [44], Siregar *et al.* considerou o problema de roteamento multicast em redes de fibra óptica WDM de grande escala, onde as solicitações de transmissão são estabelecidas por conexões ponto-a-multiponto. Os autores propuseram aGA que explora a combinação de caminhos alternativos mais curtos para as solicitações de multicast fornecidas a fim de minimizar o número de nós com capacidade de divisão necessários.

Dado um conjunto de conexões, o problema de configurar caminhos de luz roteando e atribuindo um comprimento de onda para cada conexão é chamado de problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWAP) (ver Fig. 3). Um algoritmo para resolver o RWAP dinâmico de forma distribuída foi proposto em [46]. Utiliza uma metaheurística ACO para obter informações atualizadas sobre o estado da rede, que é então empregado para encontrar as rotas e comprimentos de onda que permitem estabelecer novas conexões por meio de um processo adaptativo capaz de lidar com mudanças dinâmicas no estado da rede. Em [45], uma abordagem metaheurística PSO é proposta para resolver o RWAP estático. Para ajudar as partículas a convergir para uma solução ótima rapidamente, um novo esquema é desenvolvido para a seleção de rotas durante a busca de partículas. Em [47], Hassan e Phillips abordaram o RWAP dinâmico em redes ópticas WDM. Para resolver essa variante, eles propuseram um PSO caótico. O RWAP estático é frequentemente referido como o problema de projeto de topologia virtual [48]. Em [49], Ghose *et al.* consideram o problema

de projetar topologias virtuais para redes WDM óticas multihop. Para analisar este problema, dois algoritmos metaheurísticos foram introduzidos: GRASP e EA. Um algoritmo de roteamento ACO foi proposto em [50] para redes de fibra óptica transparentes. Ele levou em consideração a taxa de erro de bit das conexões que é derivada do ruído de emissão espontânea amplificado acumulado ao longo do caminho da luz.

A fim de maximizar o uso dos caminhos de luz, as operadoras de telecomunicações adotam uma técnica que consiste em transformar fluxos de tráfego de baixa velocidade em canais de alta capacidade [51]. Essa técnica é conhecida como RWAP com limpeza de tráfego. Em [51], Wu *et al.* propôs um algoritmo GRASP para resolver o problema de catação e roteamento de tráfego com restrições de caminho simples em redes WDM mesh e introduziu um mecanismo para lidar com a interação entre o problema de catação e o problema de roteamento. As demandas de tráfego em redes de fibra óptica WDM podem ser classificadas em três categorias [52]: demandas de lightpath permanentes ou estáticas, demandas de lightpath programadas (SLDs) e demandas de lightpath aleatórias (RLDs). Os SLDs são conhecidos com antecedência e devem estar ativos apenas por um período limitado de tempo (horas, dias ou semanas). Em [53], Marković *et al.* estudou o RWAP de SLDs em redes de multiplexação por divisão de comprimento de onda totalmente ópticas sem capacidade de conversão de comprimento de onda. Eles propuseram um novo algoritmo baseado na metaheurística BCO. Foi demonstrado que, aplicando o algoritmo proposto, melhorias significativas em termos do número de trajetórias de luz estabelecidas podem ser alcançadas levando-se em consideração informações temporais de demandas de trajetórias de luz em comparação com o caso em que esta informação não é considerada. Otimizar a troca de informações e roteamento é um problema desafiador com implicações de muitos aspectos da rede: determinar os caminhos necessários enquanto minimiza o custo, minimiza o atraso ou maximiza a confiabilidade, etc. Uma mercadoria representa uma certa demanda de tráfego de telecomunicações entre dois nós. Se vários pares de origem e destinos tiverem que ser gerenciados, o problema é definido como problema de fluxo de amulticommodity (MCFP). Masri *et al.*

em [54] estendeu o MCFP considerando múltiplas fontes para cada fluxo, e uma metaheurística ACO de resolução foi proposta.

A multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) foi recentemente proposta como uma técnica de modulação para redes ópticas devido à sua boa eficiência espectral. OFDM óptico é mais flexível em comparação aos sistemas WDM tradicionais, permitindo transmissões de largura de banda elástica. Em [55], Christodouloupoulos *et al.* apresentar o problema de roteamento e alocação de espectro em redes ópticas baseadas em OFDM, em oposição ao RWAP típico em redes WDM tradicionais. O objetivo é atender as conexões por meio de alocação de espectro adequada, com a restrição de que nenhuma sobreposição de espectro seja permitida entre essas conexões, e minimizar o espectro utilizado. Esses autores propuseram uma metaheurística SA para encontrar boas ordenações que geram um desempenho próximo ao ótimo.

Além disso, muitas pesquisas têm proposto metaheurísticas para resolver diferentes variantes de problemas de roteamento de rede. Assim, [56] introduziu um algoritmo baseado em ACO para resolver vários tipos de problemas de roteamento e congestionamento em redes de computadores. Da mesma forma, [57] abordou o canal conjunto e o problema de roteamento para aplicações multicast. Em seu trabalho, uma técnica

com base em um AG multiobjetivo foi proposto construir uma árvore multicast com restrição de atraso e interferência mínima. Da mesma forma, em [58] um GA e um algoritmo metaheurístico PSO foram propostos para maximizar a utilização e melhorar a QoS em redes em expansão.

Em uma rede de comunicação de dados, nós e arcos representam roteadores e links de transmissão, respectivamente. A engenharia de tráfego intradomínio visa fazer um uso mais eficiente dos recursos de rede em sistemas autônomos [59]. Protocolos de gateway interior, como o caminho mais curto aberto primeiro (OSPF) e o sistema intermediário-sistema intermediário são comumente usados para selecionar os caminhos ao longo dos quais o tráfego é roteado dentro de um sistema autônomo. Dado um conjunto de demandas de tráfego entre pares de origem e destino, o problema de ajuste de peso OSPF consiste em determinar os pesos a serem atribuídos aos enlaces de forma a otimizar uma função de custo, tipicamente associada a uma medida de congestionamento da rede. Um dos primeiros trabalhos, considerando até mesmo a divisão de tráfego na configuração de OSPFweight, é [60]. Mais tarde, Burrol *et al.* em [59] propõem um AG com um procedimento de busca local para o problema de definição de peso OSPF.

As redes ad hoc são um tipo de rede sem fio que não requer nenhuma infraestrutura, como um backbone ou pontos de acesso com fio. A grande vantagem das redes ad hoc é a alta flexibilidade que oferecem, mesmo quando não há infraestrutura de comunicação fixa, há altos custos de instalação ou os níveis de confiabilidade são mais baixos do que costumavam ser em outras redes. Outra vantagem das redes ad hoc é sua robustez. Devido a essas características, existem várias aplicações de redes ad hoc: elas podem ser utilizadas em locais onde é necessária uma instalação rápida. A rede ad hoc Mobile (MANET) é uma coleção de nós móveis que se comunicam por rádio. Em uma MANET, nenhuma infraestrutura é necessária para permitir a troca de informações entre usuários de dispositivos móveis. Como os nós são móveis, a topologia da rede pode mudar rapidamente e de maneira imprevisível ao longo do tempo. O principal desafio encontrado neste tipo de rede é encontrar um caminho entre os terminais de comunicação que satisfaçam os requisitos de QoS. A dificuldade deste desafio é aumentada devido à mobilidade dos nós. Em [61], uma metaheurística ACO é introduzida para tratar o problema de roteamento em uma MANET multihop. Essa abordagem consistia em três fases: descoberta de rota, manutenção de rota e tratamento de falhas de rota. Da mesma forma, em [62] um protocolo de roteamento baseado em ACO foi proposto para uma MANET que suporta comunicações multimídia. Na verdade, o multicast desempenha um papel importante nas redes sem fio ad hoc. Em [63], uma metaheurística ACO foi introduzida para roteamento multicast em redes sem fio ad hoc. Uma rede ad hoc veicular (VANET) é uma subclasse de uma MANET, frequentemente empregado em sistemas de transporte inteligentes. O multicast fornece diferentes informações de tráfego a um número limitado de motoristas de veículos por meio de uma transmissão paralela. Porém, representa um desafio muito importante na aplicação de VANETs, principalmente no caso da escalabilidade da rede. Em [64], Bitam e Mellouk propuseram um novo algoritmo BCO para resolver o problema de roteamento multicast QoS para VANETs com restrições múltiplas. Mais recentemente, [65] propôs um algoritmo inteligente de roteamento híbrido que combina uma abordagem PSO e uma abordagem ACO com o objetivo de melhorar várias métricas de desempenho em MANET representa um desafio muito importante na aplicação de VANETs, principalmente no caso da escalabilidade da rede. Em [64], Bitam e Mellouk propuseram um novo algoritmo BCO para resolver o problema de roteamento multicast QoS para VANETs com restrições múltiplas. Mais recentemente, [65] propôs um algoritmo inteligente de roteamento híbrido que combina uma abordagem PSO e uma abordagem ACO com o objetivo de melhorar várias métricas de desempenho em MANET

TABELA III
METAHEURÍSTICAS EM APLICAÇÃO À SAÍDA DE NETWORK DESIGN
PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Artigo	Problema de Otimização	Solução Única	Populacional
[44]	Roteamento multicast		GA
[46]	RWA Distribuído		ACO
[45]	RWA estático		PSO
[47]	RWA Dinâmico		PSO
[49]	Roteamento virtual	ENTENDER	EA
[50]	RWA adaptativo		ACO
[51]	Trafficking	ENTENDER	
[53]	RWA de SLDs		BCO
[54]	MCFP		ACO
[55]	MCFP	SA	
[56]	Roteamento de rede		ACO
[57]	Roteamento multicast		GA
[58]	Roteamento MANET		Híbrido
[60]	Configuração de peso OSPF	LS	
[59]	Configuração de peso		GA
[61]	Roteamento MANET		ACO
[62]	Roteamento MANET		ACO
[63]	Roteamento multicast		ACO
[64]	QoS-MRP VANET		BCO
[65]	Roteamento MANET		Híbrido
[66]	Roteamento MANET	SA	

roteamento, incluindo: atraso, ponto a ponto, consumo de energia e custos de comunicação. Além disso, em [66] um esquema de roteamento multipath empregando SA foi introduzido para lidar com uma situação hostil do mundo real dinâmico no problema de roteamento MANET de conflito.

A Tabela III resume os artigos que propuseram metaheurísticas aplicadas a problemas de projeto de redes de roteamento. Até agora, metaheurísticas baseadas em população como GAs e ACOs são as mais empregadas nesses problemas de roteamento.

VI. C HANNEL UMA LOCALIZAÇÃO E O THER P ROBLEMS

Outro problema relevante é a alocação de canais no celular

sistema de rádio. O rápido crescimento de usuários de telefones celulares trouxe a necessidade de reutilização eficiente do espectro de frequência limitado alocado para comunicações móveis celulares [67]. A reutilização e eficiência desse espectro também é importante do ponto de vista financeiro, pois menos espectro necessário para oferecer serviços ao mesmo número de usuários significa menor custo. No cenário atual dos serviços móveis celulares, as frequências de transmissão são agrupadas em bandas que geralmente são codificadas em um conjunto de canais. Assim, cada estação base recebe uma parte do número total de canais disponíveis para todo o sistema. Portanto, é importante estabelecer uma estratégia a fim de reduzir o uso total das frequências disponíveis. Infelizmente, quando se trata de comunicação sem fio, existe o problema de interferência - um fenômeno que representa a superposição de duas ou mais ondas eletromagnéticas no mesmo ponto. Algumas abordagens foram desenvolvidas a fim de resolvê-lo. Em [68], um problema de alocação de canal é considerado. O objetivo é minimizar a probabilidade de bloqueio média ponderada sujeita a restrições de interferência de co-canal em um sistema móvel celular. Esses autores simplificaram o problema usando o conceito de padrão e aplicaram um procedimento SA para lidar com ele. Da mesma forma, em [69] um GA é O objetivo é minimizar a probabilidade de bloqueio média ponderada sujeita a restrições de interferência de co-canal em um sistema móvel celular. Esses autores simplificaram o problema usando o conceito de padrão e aplicaram um procedimento SA para lidar com ele. Da mesma forma, em [69] um GA é O objetivo é minimizar a probabilidade de bloqueio média ponderada sujeita a restrições de interferência de co-canal em um sistema móvel celular. Esses autores simplificaram o problema usando o conceito de padrão e aplicaram um procedimento SA para lidar com ele. Da mesma forma, em [69] um GA é

TABELA IV
METAHEURÍSTICAS PARA APLICADO A OUTRA TELECOMUNICAÇÃO
OPTIMIZAÇÃO PROBLEMS

Artigo	Problema de Otimização	Solução Única	Populacional
[2]	Recurso de alocação	SA	Híbrido
[68]	Recurso de alocação		
[69]	Recurso de alocação		GA
[71]	Problema de posicionamento	TS	ACO
[72]	Problema de posicionamento		ACO
[73]	Redes IP		GA
[74]	Recurso de alocação		Híbrido

introduzido para alocação de canal híbrido. Ele se concentra em reduzir a interferência em redes celulares.

Junto com o rápido crescimento das redes celulares móveis, as redes de sensores sem fio (RSSF) têm evoluído. Uma RSSF é geralmente descrita como uma rede de nós que rastreia as condições físicas ou ambientais, permitindo interações entre pessoas ou computadores e o ambiente envolvente [70]. Durante a implantação de uma RSSF, um objetivo principal é a cobertura total da região de monitoramento com um número mínimo de sensores e um consumo mínimo de energia da rede. Em [71], um ACO multiobjetivo é usado para resolver este problema. Posteriormente, em [72], um algoritmo semelhante é proposto para minimizar o número de sensores necessários enquanto cobre uma área máxima. Devido à escassez de espectro e à alta demanda de serviços, o mesmo problema que se apresenta nas redes móveis também é um problema nas redes de comunicação por satélite. O desafio de atribuir serviços de telecomunicações a recursos do espectro de satélites foi modelado como um problema de embalagem. Assim, em [73], uma metodologia de projeto de rede de pacotes foi introduzida para atribuir fluxo e capacidades sob restrições de QoS fim-a-fim. A abordagem de resolução é baseada no uso de um GA e um TS.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a computação distribuída pela Internet tornou-se cada vez mais popular, o que trouxe novos paradigmas emergentes. No entanto, o escasso nível de disponibilidade de recursos não dedicados constitui um importante desafio para a gama de possíveis aplicações desses sistemas. Em [74], uma abordagem de otimização de simulação foi proposta para uma implantação de serviço com custo-benefício e com reconhecimento de disponibilidade. Da mesma forma, em [2], Mazza *et al.* lidou com o problema de alocação de recursos para suportar o acesso rápido de dispositivos móveis. Eles apresentaram uma heurística aleatória enviesada [75] para apoiar a seleção de links rápida e eficiente.

A Tabela IV resume as informações revisadas nesta seção. Observe a diversidade de metaheurísticas que têm sido usadas para lidar com esses problemas, incluindo os híbridos.

VII. EMERGENTES TENDÊNCIAS E CHALLENGES

O uso de metaheurísticas aumentou durante as últimas duas décadas para resolver muitos problemas de telecomunicações, como localização de hub, design de topologia, atribuição de servidor confiável, atribuição de frequência e alocação de comprimento de onda, roteamento, etc. Por meio de uma extensa análise da literatura, diferentes tendências podem ser identificados quanto à solução desses problemas.

Uma tendência na área de redes de telecomunicações é a busca por designs mais eficazes. De acordo com as informações de tráfego disponíveis, o tipo de projeto de rede pode ser classificado como projeto determinístico, projeto estocástico e projeto robusto. Neste último, apenas informações sobre as dimensões do tráfego são assumidas. No problema de alocação de recursos para um projeto de rede robusto, uma desalocação de capacidades pode ter dois efeitos colaterais:

- 1) perda significativa de dados para determinado tráfego - ou seja, um design não robusto e
- 2) superdimensionamento das capacidades instaladas - ou seja, um design robusto com alto custo de investimento. Ambos os efeitos indesejáveis justificam a necessidade de algoritmos metaheurísticos para alcançar uma alocação eficiente de recursos.

Outra tendência observada é a predominância atual de metaheurísticas de base populacional sobre as de solução única. Em nossa opinião, ambas são abordagens válidas e, portanto, muitas pesquisas ainda podem ser feitas a respeito do uso de metaheurísticas de solução única no campo das telecomunicações. Na verdade, metaheurísticas de solução única podem oferecer algumas vantagens sobre as abordagens baseadas em população, uma vez que as primeiras geralmente empregam menos parâmetros e podem ser mais fáceis de implementar em aplicações práticas. Em relação aos casos de teste e avaliação de desempenho dos algoritmos propostos encontrados na revisão da literatura, pode-se notar a predominância de instâncias de pequeno e médio porte. Isso provavelmente se deve ao tempo de computação necessário para resolver instâncias de grande porte. Contudo, na maioria dos sistemas de telecomunicações da vida real, uma solução pode ser necessária após alguns segundos ou milissegundos. Essas aplicações justificam a necessidade de desenvolver algoritmos heurísticos e metaheurísticos mais rápidos, que podem ser capazes de fornecer boas soluções em tempo quase real para instâncias de grande porte com milhares ou até milhões de nós.

Além disso, devido ao desenvolvimento crescente em tecnologias digitais e de medição, a quantidade de diferentes dispositivos móveis eletrônicos ao nosso redor está aumentando. Esta tecnologia móvel está sendo massivamente utilizada hoje em cidades inteligentes, o que coloca diversos desafios relacionados ao uso de tecnologias de comunicação 5G, serviços de computação em nuvem, segurança, confiança e privacidade, etc. Nesse contexto, o uso de algoritmos metaheurísticos rápidos torna-se necessário para lidar com os problemas de comunicação de design associados. Durante os próximos anos, novos problemas desafiadores surgirão na indústria de telecomunicações. Por exemplo, observamos uma expansão das tecnologias sem fio, uma demanda crescente por QoS mais alto, um aumento contínuo no fluxo de tráfego e um forte crescimento no uso de redes móveis ad hoc e ponto a ponto. Esses desafios emergentes geram novos COPs caracterizados por incertezas e condições dinâmicas. Apesar do fato de que as metaheurísticas constituem uma ferramenta poderosa para lidar com problemas complexos de otimização no campo dos sistemas de telecomunicações, a maioria das abordagens existentes na literatura científica foram desenvolvidas assumindo entradas e restrições determinísticas e estáticas, o que representa uma simplificação excessiva do mundo real condições que caracterizam os sistemas de telecomunicações. Para incluir a incerteza nos modelos de otimização, algoritmos simheurísticos integram metaheurísticas com simulação. Esta hibridização nos permite enfrentar COPs estocásticos de uma forma natural e eficiente [18]. Da mesma forma, a fim de incluir entradas dinâmicas nos modelos de otimização, aprender algoritmos heurísticos que combinam metaheurísticas com aprendizado de máquina

técnicas foram propostas recentemente como uma abordagem nova e promissora ainda a ser explorada em detalhes [19]. Com efeito, alguns problemas no campo das telecomunicações são caracterizados por entradas que não são corrigidas antecipadamente (por exemplo, o desempenho dos dispositivos de transmissão). Em vez disso, essas entradas podem variar de acordo com as propriedades da solução (por exemplo, o número de usuários atribuídos a elas). Assim, durante a geração de cada nova solução, uma técnica de aprendizado de máquina - como uma rede neural - pode ser empregada iterativamente para estimar e atualizar os valores dessas entradas após cada etapa da heurística construtiva (por exemplo, conforme novos usuários são atribuídos para cada canal disponível).

VIII. CONCLUSÃO E FUTURA CORK

Devido ao número crescente de novos desafios de otimização na indústria de telecomunicações, os algoritmos metaheurísticos têm recebido uma atenção cada vez maior nas últimas duas décadas. Este artigo oferece uma revisão de trabalhos recentes que propõem diferentes abordagens metaheurísticas para lidar de forma eficiente com os desafios mencionados. Três campos principais de telecomunicações foram o foco deste artigo: design, roteamento e alocação de redes. Dentro desses campos, vários subproblemas foram identificados, uma vez que o projeto de sistemas de telecomunicações compreende muitos aspectos diferentes, incluindo: topologias, localização de recursos em links e nós, roteamento unicast versus multicast, confiabilidade e disponibilidade de redes, etc., pode-se concluir que, até agora, metaheurísticas baseadas na população - como GAs, Otimização ACO, e PSO - são mais populares do que os de solução única - como TS, GRASP ou SA. Isso provavelmente se deve ao fato de a maioria dos autores pertencer a departamentos de informática, onde o uso de metaheurísticas de base populacional é amplamente estendido. No entanto, isso também oferece uma boa chance para pesquisadores em outros campos - por exemplo, pesquisa operacional ou engenharia industrial - propor novas abordagens de solução única que normalmente requerem menos parâmetros e podem ser mais fáceis de implementar em cenários da vida real.

Com o surgimento de novos sistemas de telecomunicações móveis e descentralizados, aspectos como incerteza e dinamismo são mais relevantes do que nunca. Por esta razão, espera-se que nos próximos anos surjam novos desafios relacionados ao uso de comunicações móveis e sem fio em ambientes complexos como cidades inteligentes ou computação em nuvem. Para resolver esses desafios, uma nova geração de métodos de otimização híbridos combinando metaheurísticas com simulação e técnicas de aprendizado de máquina se tornará o tópico de estudo de muitos pesquisadores e profissionais.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Moganarangan, R. Babukarthik, S. Bhuvaneswari, MS Basha, e P. Dhavachelvan, "Um novo algoritmo para reduzir o consumo de energia em ambiente de computação em nuvem", *J. King Saud Univ.-Comput. Inf. Sci.*, vol. 28, nº 1, pp. 55-67, 2016.
- [2] D. Mazza, A. Pagès-Bernaus, D. Tarchi, AA Juan e GE Corazza, "Supporting mobile cloud computing in smart cities via randomized algorithms," *IEEE Syst. J.*, a ser publicado.
- [3] C. Blum e A. Roli, "Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual compare," *ACM Comput. Pesquisas*, vol. 35, não. 3, pp. 268-308, 2003.
- [4] MG Resende e PM Pardalos, *Manual de Otimização em Telecomunicações*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
- [5] SL Martins e CC Ribeiro, "Metaheurísticas e aplicações para problemas de otimização em telecomunicações," in *Manual de Otimização em Telecomunicações*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2006, pp. 103-128.
- [6] PC Pop, *Problemas generalizados de projeto de rede: modelagem e otimização*. Berlín, Alemanha: Walter de Gruyter, 2012.
- [7] M. Pióro e D. Medhi, *Roteamento, Fluxo e Projeto de Capacidade em Redes de Comunicação e Computadores*. Nova York, NY, EUA: Elsevier, 2004.
- [8] F. Glover, "Tabu search and adaptive memory programming-advance, applications and challenge," in *Interfaces em Ciência da Computação e Pesquisa Operacional*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1997, pp. 1-75.
- [9] TA Feo e MG Resende, "Greedy randomized randomized adaptive search procedures," *J. Global Optim.*, vol. 6, não. 2, pp. 109-133, 1995.
- [10] S. Kirkpatrick, CD Gelatt e M. P. Vecchi, "Otimização por recozimento simulado", *Ciência*, vol. 220, não. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [11] HR Lourenço, OC Martin e T. Stützle, "Iterated local search: Framework and applications," in *Handbook of Metaheuristics*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2010, pp. 363-397.
- [12] DE Goldberg, *Algoritmos genéticos*. Londres, Reino Unido: Pearson Educ. Índia, 2006.
- [13] J. Kennedy e Y. Shi, *Swarm Intelligence*. New York, NY, EUA: Elsevier, 2001.
- [14] A. Brabazon, M. O'Neill e S. McGarraghy, *Algoritmos de computação natural*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2015.
- [15] GR Raidl, "A unified view on hybrid metaheuristics," *Metaheurísticas híbridas*, vol. 4030, pp. 1-12, 2006.
- [16] C. Blum, J. Puchinger, GR Raidl e A. Roli, "Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey," *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, não. 6, pp. 4135-4151, 2011.
- [17] MA Boschetti, V. Maniezzo, M. Rofilli, e AB Röhrler, "Matheuristics: Optimization, simulação and control," em *Proc. Int. Metaheurísticas Híbridas de Oficina*, 2009, pp. 171-177.
- [18] AA Juan, J. Faulin, SE Grasman, M. Rabe e G. Figueira, "Uma revisão da simheurística: Estendendo metaheurísticas para lidar com problemas de otimização combinatória estocástica," *Oper. Res. Perspectivas*, vol. 2, pp. 62-72, 2015.
- [19] L. Calvet, J. d. Armas, D. Masip e AA Juan, "Learnheuristics: Hybridizing metaheuristics with machine learning for optimization with dynamic inputs," *Open Math.*, vol. 15, não. 1, pp. 261-280, 2017.
- [20] B. Dengiz, F. Altıparmak e A. E. Smith, "algoritmo genético de busca local para projeto ideal de redes confiáveis", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 1, não. 3, pp. 179-188, setembro de 1997.
- [21] JG Kincewicz, "Hub location in backbone / tributary network design: A review," *Localização Sci.*, vol. 6, não. 14, pp. 307-335, 1998.
- [22] S. Chamberland, B. Sansó e O. Marcotte, "Projeto topológico de redes de telecomunicações de dois níveis com comutadores modulares", *Oper. Res.*, vol. 48, nº 5, pp. 745-760, 2000.
- [23] TCS Dias, GF de Sousa Filho, EM Macambira, FC Lucidio dos Anjos e MHC Fampa, "Uma heurística eficiente para o problema da estrela do anel," em *Proc. Int. Workshop Exp. Algoritmos Eficientes*, 2006, pp. 24-35.
- [24] A. Girard, B. Sansó e L. Dadjio, "A tabu search algorithm for access network design," *Ann. Oper. Res.*, vol. 106, nº 1-4, pp. 229-262, 2001.
- [25] G. Carello, F. Della Croce, M. Ghirardi e R. Tadel, "Resolvendo o problema de localização de hub no projeto de rede de telecomunicações: Uma abordagem de pesquisa local", *Redes*, vol. 44, não. 2, pp. 94-105, 2004.
- [26] SD Flores, BB Cegla e DB Cáceres, "Projeto de rede de telecomunicações com algoritmos evolutivos multiobjetivos paralelos", em *Proc. Latin Amer. Conf. Em direção à América Latina. Agenda Netw. Res.*, 2003, pp. 1-11.
- [27] J. Li e Y. Pan, "Projeto de topologia orientado por codificação de rede baseado em algoritmo genético paralelo", em *Proc. 4ª Int. Joint Conf. Comput. Sci. Otim.*, Abril de 2011, pp. 838-841.
- [28] LF Santos, R. Milagres, CV Albuquerque, S. Martins e A. Plastino, "NGL01-4: A Hybrid GRASP com mineração de dados para replicação de servidor eficiente para multicast confiável", em *Proc. IEEE Globecom*, 2006, pp. 1-6.
- [29] S. Abidinour-Helm, "Ahybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem," *EUR. J. Oper. Res.*, vol. 106, nº 2, pp. 489-499, 1998.
- [30] BN Gomes, AX Martins, RS de Camargo, e JA Ramirez, "Um algoritmo genético eficiente para o projeto de redes hub-and-spoke," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, não. 4, pp. 793-796, 2013.
- [31] JU Sun, "Uma abordagem meta-heurística combinada para otimizar um problema de design de rede hub e spoke", em *Proc. IASTED Int. Conf. Modelo. Simul.*, 2012, pp. 1-10.

- [32] S. Kulturel-Konak e A. Konak, "Otimização de simulação de otimização de enxame de partículas incorporadas para atribuição de servidor confiável", em *Proc. Winter Simul. Conf.*, 2010, pp. 2897–2906.
- [33] A. Konak e S. Kulturel-Konak, "Reliable server assign in networks using nature inspired metaheuristics," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 60, não. 2, pp. 381–393, junho de 2011.
- [34] SL Hakimi, "Ótimas localizações de centros de comutação e os centros absolutos e medianas de um gráfico," *Oper. Res.*, vol. 12, não. 3, pp. 450–459, 1964.
- [35] A. Konak, S. Kulturel-Konak e LV Snyder, "Um algoritmo genético de teoria do jogo para o problema de atribuição de servidor confiável sob ataques", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 85, pp. 73–85, 2015.
- [36] B. Diaz-Baez, DP Pinto-Roa e C. von Lucken, "Projeto de rede robusta sob tráfego incerto uma abordagem baseada em algoritmo genético", em *Proc. Latin Amer. Comput. Conf.*, 2013, pp. 1–8.
- [37] A. Arteta e DP Pinto-Roa, "Projeto de rede robusta multiobjetivo sob tráfego incerto uma abordagem baseada em algoritmo evolutivo", em *Proc. Latin Amer. Comput. Conf.*, 2015, pp. 1–10.
- [38] LA Cox e JR Sanchez, "Projetando redes backhaul sem fio com sobrevivência de menor custo", *J. Heurística*, vol. 6, não. 4, pp. 525–540, 2000.
- [39] C. Papagianni, K. Papadopoulos, C. Pampas, ND Tselikas, DT Kaklamani e IS Venieris, "Communication network design using particle swarm optimization," in *Proc. Int. Multiconf. Comput. Sci. Inf. Technol.*, 2008, pp. 915–920.
- [40] M. Dasgupta, GP Biswas e C. Bhar, "Otimização de objetivos múltiplos e projeto topológico de redes de dados usando algoritmo genético", em *Proc. Int. Conf. Adv. Recente Inf. Technol.*, 2012, pp. 256–262.
- [41] R. Ramaswami, K. Sivarajan e G. Sasaki, *Redes ópticas: uma perspectiva prática*. San Mateo, CA, EUA: Morgan Kaufmann, 2009.
- [42] I. Chlamtac, A. Ganz e G. Karmi, "Lightpath Communications: An approach to high bandwidth óptico WAN's," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, não. 7, pp. 1171–1182, Jul. 1992.
- [43] LH Sahasrabudde e B. Mukherjee, "Light trees: Optical multicast para melhor desempenho em redes roteadas de comprimento de onda", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 37, n° 2, pp. 67–73, fevereiro de 1999.
- [44] JH Siregar, Y. Zhang e H. Takagi, "Optimal multicast routing using genetic algorithm for WDM óptico networks", *IEICE Trans. Commun.*, vol. 88, n° 1, pp. 219–226, 2005.
- [45] A. Hassan e C. Phillips, "Roteamento estático e atribuição de comprimento de onda inspirado pela otimização de enxame de partículas", em *Proc. Int. Conf. Inf. Commun. Technol.*, 2008, pp. 1–6.
- [46] VM Aragón *et al.*, *A New Algorithm for the Distributed RWA Problem in WDM Networks Using Ant Colony Optimization*. Berlin, Germany: Springer, 2007, pp. 299–308.
- [47] A. Hassan e C. Phillips, "Otimização de enxame de partículas caóticas para roteamento dinâmico e atribuição de comprimento de onda em redes WDM totalmente ópticas", em *Proc. Int. Conf. Processo de sinal. Comun. Syst.*, 2009, pp. 1–7.
- [48] R. Dutta e GN Rouskas, *Projeto de topologias lógicas para redes roteadas por comprimento de onda*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2002, pp. 79–102.
- [49] S. Ghose, R. Kumar, N. Banerjee e R. Datta, "Projeto de topologia virtual Multihop em redes ópticas WDM para tráfego auto-similar," *Fóton. Netw. Comun.*, vol. 10, não. 2, pp. 199–214, 2005.
- [50] GS Pavani e H. Waldman, "Roteamento adaptativo e atribuição de comprimento de onda com restrições de energia usando otimização de colônia de formigas", em *Proc. Int. Telecommun. Symp.*, 2006, pp. 637–642.
- [51] X. Wu, T. Ye, Q. Guo e Z. L., "GRASP para preparação de tráfego e roteamento com restrições de caminho simples em redes de malha WDM", *Comput. Netw.*, vol. 86, pp. 27–39, 2015.
- [52] M. Gagnaire, M. Koubaa e N. Puech, "Dimensionamento de rede sob demandas de lightpath programadas e aleatórias em redes WDM totalmente ópticas", *J. Sel. Áreas Comuns*, vol. 25, não. 9, pp. 58–67, 2007.
- [53] G. Marković, V. Acimović-Raspopović e V. Radojičić, "A heuristic algorithm for lightpath scheduling in next-generation WDM óptico networks", *Fóton. Netw. Comun.*, vol. 23, não. 3, pp. 272–284, 2012.
- [54] H. Masri, S. Krichen, e A. Guitouni, "Uma metaheurística de otimização de colônia de formigas para resolver o problema de fluxo de comunicação de multicommodidade de múltiplas fontes bi-objetivo," em *Proc. 4º Conjunto IFIP Wireless Mobile Netw. Conf.*, 2011, pp. 1–8.
- [55] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, e EA Varvarigos, "Roteamento e alocação de espectro em redes ópticas baseadas em OFDM com alocação de largura de banda elástica," em *Proc. IEEE Globecom*, 2010, pp. 1–6.
- [56] KM Sim e WH Sun, "Otimização de múltiplas colônias de formigas para roteamento de rede", em *Proc. 1ª Int. Symp. Cyber Worlds*, 2002, pp. 277–281.
- [57] E. Vaezpour e M. Dehghan, "Uma abordagem de otimização multi-objetivo para atribuição conjunta de canal e roteamento multicast em redes mesh sem fio multicanal multi-rádio", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 77, não. 2, pp. 1055–1076, 2014.
- [58] H. Kusetogullari, MS Leeson, W. Ren e EL Hines, "K- solução de problema de rede de caminho mais curto com um algoritmo genético híbrido: algoritmo de otimização de enxame de partículas", em *Proc. 13th Int. Conf. Trans. Optar. Netw.*, 2011, pp. 1–4.
- [59] L. Buriol, M. Resende, C. Ribeiro, e M. Thorup, "Um algoritmo genético híbrido para o problema de definição de peso no roteamento OSPF / IS-IS," *Redes*, vol. 46, não. 1, pp. 36–56, 2005.
- [60] B. Fortz e M. Thorup, "Aumentando a capacidade da Internet usando a pesquisa local", *Comput. Optar. Appl.*, vol. 29, n° 1, pp. 13–48, 2004.
- [61] M. Gunes, U. Sorges e I. Bouazizi, "ARA-the ant-colony based routing algorithm for MANETs", em *Proc. Int. Conf. Processo paralelo. Oficina*, 2002, pp. 79–85.
- [62] P. Deepalakshmi e S. Radhakrishnan, "algoritmo de roteamento QoS para redes móveis ad hoc usando ACO," em *Proc. Int. Conf. Control Autom. Comun. Conservação de energia*, 2009, pp. 1–6.
- [63] S. Mangai, A. Tamilarasi e C. Venkatesh, "Implementação do protocolo de roteamento multicast de núcleo dinâmico usando otimização de colônia de formigas em redes sem fio ad hoc", em *Proc. Int. Conf. Comput. Comun. Netw.*, 2008, pp. 1–5.
- [64] S. Bitam e A. Mellouk, "Otimização de roteamento multicast multi-restrições baseada na vida de abelha para redes ad hoc veiculares", *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 36, não. 3, pp. 981–991, 2013.
- [65] B. Nancharaiiah e BC Mohan, "The performance of a hybrid routing smart algorithm in a mobile ad hoc network," *Comput. Eleger. Eng.*, vol. 40, não. 4, pp. 1255–1264, 2014.
- [66] S. Kim, "Adaptive MANET multipath Routing Algoritmo baseado na abordagem de reconhecimento simulado", *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, art. não. 872526.
- [67] WC Lee, *Telecomunicações móveis celulares: sistemas analógicos e digitais*, 2ª ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1995.
- [68] K. Soo-Hyun, K.-N. Chang e S. Kim, "A channel alocação para sistemas de rádio móvel celular usando reconhecimento simulado", *Telecommun. Syst.*, vol. 14, não. 1–4, pp. 95–106, 2000.
- [69] SN Ohatkar e DS Bormane, "Uma técnica de otimização para alocação de canal eficiente na rede celular", *J. Commun. Technol. Elétron.*, vol. 59, n° 11, pp. 1225–1233, 2014.
- [70] A. Bröring *et al.*, "Ativação da web de sensor de nova geração", *Sensores*, vol. 11, não. 3, pp. 2652–2699, 2011.
- [71] S. Fidanova, P. Marinov e M. Paprzycki, *Influência do número de formigas no algoritmo de otimização de colônia de formigas multi-objetivo para layout de rede de sensores sem fio*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2014, pp. 232–239.
- [72] PP Das, N. Chakraborty e SM Allayear, "Cobertura ideal da rede de sensores sem fio usando algoritmo de otimização de colônia de cupins", em *Proc. Int. Conf. Eleger. Eng. Inf. Commun. Technol.*, 2015, pp. 1–6.
- [73] ECG Wille, M. Mellia, E. Leonardi e M. Ajmone Marsan, *Projeto topológico de redes IP sobreviventes utilizando abordagens metaheurísticas*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005, pp. 191–206.
- [74] G. Cabrera, AA Juan, D. Lázaro, JM Marqués e I. Proskurnia, "Uma abordagem de otimização de simulação para implantar serviços de Internet em sistemas de grande escala com recursos fornecidos pelo usuário", *Simulação*, vol. 90, não. 6, pp. 644–659, 2014.
- [75] A. Grasas, AA Juan, J. Faulin, J. de Armas e H. Ramalinho, "Randomização enviesada de heurísticas usando distribuições de probabilidade distorcidas," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 110, pp. 216–228, 2017.

Fotografias e biografias dos autores não disponíveis no momento da publicação.