



Ações estratégicas para redes futuras

Tendências em
Conectividade Óptica

M1 A1.1

FUNTTEL

FUNDO PARA O DESENVOLVIMENTO
TECNOLÓGICO DAS TELECOMUNICAÇÕES

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro dado a este trabalho por meio do FUNTEL (Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações) e da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), sob o processo n.º 1508/22. Este artigo reflete apenas as opiniões dos autores; as agências não são responsáveis por qualquer uso que possa ser feito das informações nele contidas.

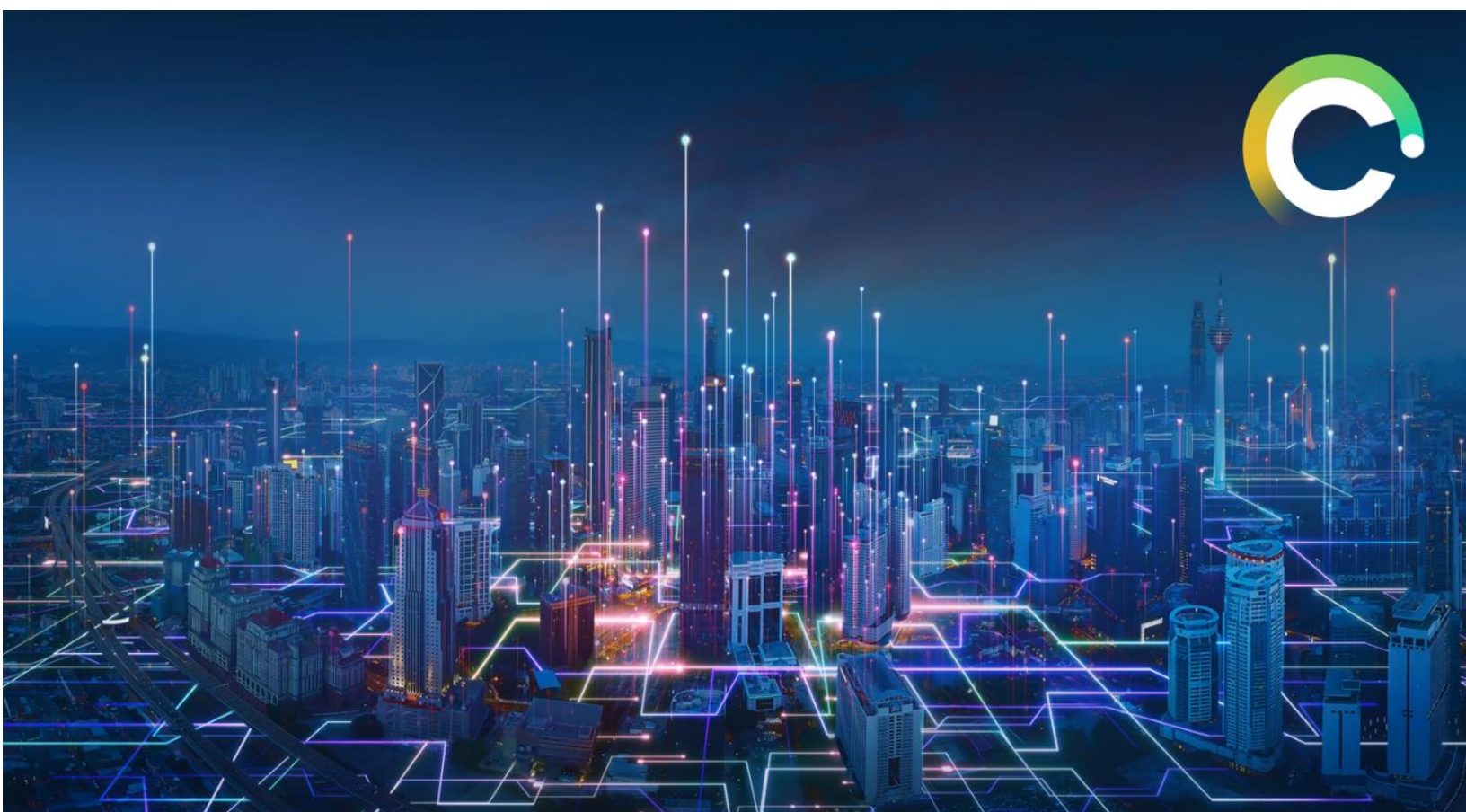
An abstract graphic of a globe is positioned on the left side of the page. The globe is covered with a complex network of lines in blue, orange, and black, representing optical connections. These lines are interspersed with small circles of the same colors, symbolizing nodes or data points in a network. The globe itself is rendered with a grid of dots, giving it a textured appearance.

TENDÊNCIAS EM CONECTIVIDADE ÓPTICA

1. INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram marcadas por um acelerado processo de avanços tecnológicos, o qual, em grande medida, foi impulsionado por sociedades, economias e governos cada vez mais conectados, dinâmicos e interdependentes. Dessa forma, é natural que as tecnologias de Conectividade e, em especial, de Comunicações Ópticas se tornem um elemento central em tal processo, sendo, atualmente, uma ferramenta fundamental para garantir inserção social, competitividade econômica e soberania estratégica de todas as nações.

Em tal contexto, o presente documento apresenta as principais tendências tecnológicas para o setor, divididas em diferentes horizontes temporais de desenvolvimento e adoção, as quais foram obtidas a partir de um profundo levantamento bibliográfico, incluindo: na Seção 2, redes de comunicação de longa distância; na Seção 3, redes de conexão ao usuário final; na Seção 4, a convergência de redes ópticas e sem fio; na Seção 5, comunicações mais seguras; na Seção 6, a conectividade significativa; e, por fim, nas Seções 7 e 8, as considerações finais e a contribuição do CPQD para o avanço tecnológico da área e para a promoção da conectividade.



2. REDES DE COMUNICAÇÃO DE LONGA DISTÂNCIA

Entre os possíveis cenários de aplicação, historicamente, as redes ópticas de telecomunicações se destacam pela sua capacidade de transmitir grandes volumes de dados por longas distâncias, tendo viabilizado uma revolução tecnológica a partir da década de 1980 que impulsionou o surgimento de uma sociedade intrinsecamente conectada. Atualmente, as redes ópticas ainda são a tecnologia fundamental para prover conectividade de longa distância, sendo um elemento-chave para a interconexão de continentes, regiões urbanas e centrais de dados. Dessa forma, é natural que haja uma incessante necessidade de aumento da capacidade de tais sistemas, de modo a suportar o constante surgimento de novos paradigmas tecnológicos e sociais, exemplificados, no passado recente, por conceitos, como, por exemplo, o consumo de conteúdo sob demanda, o armazenamento e processamento de dados na nuvem e a quinta geração de redes móveis (5G). Entretanto, especificamente para a transmissão de dados em longa distância, a criticidade da aplicação e o alto volume de dados a serem trafegados permitem a adoção de soluções tecnológicas de maior complexidade, mesmo considerando o seu maior impacto nos custos de instalação e operação de tais sistemas. Portanto, conforme evidenciado pelas tendências listadas na Figura 1 para diversos cenários de adoção, é natural que as redes ópticas de longa distância sejam o primeiro cenário a adotar comercialmente tecnologias na fronteira do conhecimento tecnológico, explorando soluções avançadas e impulsionando o constante avanço do setor.

Em tal cenário, o futuro das redes ópticas de longo alcance deve incluir a crescente demanda por volumes de dados a serem trafegados, especialmente em um panorama tecnológico caracterizado pela popularização de tecnologias, como, por exemplo, a realidade aumentada e virtual, a inteligência artificial, o metaverso e a sexta geração de redes móveis (6G). Visando suportar tal perspectiva, a academia e a indústria do setor já preveem o desenvolvimento de uma nova geração de sistemas ópticos, o qual deverá ser fundamentalmente marcado pela evolução de tecnologias que permitam aumentar: a quantidade de canais trafegados em uma mesma fibra óptica, a capacidade de dados trafegados em cada canal óptico, a eficiência operacional da rede através da ampliação de sua flexibilidade e reconfigurabilidade, bem como a competitividade no setor através do desenvolvimento de padrões abertos e interoperáveis para os equipamentos ópticos. Para tanto, é necessário especificamente o desenvolvimento de novas tecnologias tanto na camada física (ou seja, para a fabricação dos dispositivos e equipamentos responsáveis pela geração, transmissão e recepção dos canais ópticos) como nas camadas de controle e gerenciamento (ou seja, para o controle efetivo e flexível de tais elementos). Adicionalmente, tais desenvolvimentos devem ser baseados em uma perspectiva holística dessas redes, trazendo soluções que integrem com eficiência os seus mais diversos elementos.

Especificamente, no que tange às tecnologias para a camada física, uma clara tendência para a ampliação da capacidade dos enlaces ópticos é o desenvolvimento de soluções que permitam aumentar a quantidade de canais transmitidos em cada fibra óptica instalada. Para

tanto, em um futuro de curto prazo, o setor deve se basear no uso de novas frequências ópticas (expandindo as atuais redes em banda C para as bandas L e, posteriormente, S), permitindo um aumento de 2 a 3 vezes na capacidade de determinado enlace óptico já instalado em campo [1] (tendência 3 no H1, na Figura 1). Em especial, a preferência por tal solução se baseia na possibilidade de reuso dos cabos ópticos já instalados e na exploração de tecnologias maduras e comercialmente viáveis para a geração, transmissão e recepção dos canais ópticos, com menos riscos e menos custos associados. De modo complementar, em um futuro de médio a longo prazo, há a aposta no desenvolvimento de uma nova geração de fibras ópticas, as quais permitem suportar a combinação de canais em diversos caminhos ópticos (sejam eles em diferentes núcleos ou em diferentes modos de propagação) ao longo da sua transmissão pelo enlace [2] (tendência 2 no H3). Entretanto, ainda existem desafios significativos para garantir a viabilidade técnica e econômica de tal solução, especialmente considerando os custos de instalação de tais fibras ópticas e a dificuldade para evitar a interferência entre os canais ópticos transmitidos.

De modo complementar, a indústria também continua explorando o desenvolvimento de novas soluções que permitam aumentar a capacidade de transmissão de determinado canal óptico, chegando a taxas padronizadas de 400 Gb/s (tendência 1 no H1), 800 Gb/s (tendência 1 no H2) e, até mesmo, 1600 Gb/s (tendência 1 no H3). Tal abordagem já permitiu inúmeros saltos de desempenho dos sistemas ópticos nas últimas décadas, sendo, usualmente, a solução preferencial para o setor, uma vez que somente demanda a atualização dos equipamentos ópticos instalados nas pontas do enlace (ou seja, no transmissor e no

receptor). Entretanto, de forma análoga ao que ocorre em outros setores, o desempenho da solução demandada está continuamente se aproximando dos limites teóricos de operação da microeletrônica, da fotônica e, em último estágio, da própria física, exigindo o desenvolvimento de chips cada vez mais complexos, custosos e com maior consumo energético.

Em tal cenário, a indústria persegue constantemente o desenvolvimento de novos algoritmos para a geração e recuperação dos dados transmitidos, incluindo a compensação de efeitos não lineares (tendência 2 no H1), além de novas soluções em fotônica integrada com *co-packaging* (tendência 2 no H2) e em microeletrônica para viabilizar a fabricação dos elementos ópticos que constituem o transmissor e o receptor em um enlace óptico.

Adicionalmente, a crescente complexidade de tais redes demanda também o desenvolvimento de novas soluções para o chaveamento e redirecionamento de canais ópticos e, até mesmo, pacotes de dados, tarefas preferencialmente realizadas completamente no domínio óptico (tendência 3 do H2).



Figura 1 – Tendências tecnológicas para redes de comunicação de longa distância

Por fim, conforme anteriormente citado, há também uma forte demanda pelo desenvolvimento de novas soluções para o controle e gerenciamento dos equipamentos e dispositivos ópticos utilizados na geração, transmissão e recepção de tais sinais. Nesse contexto, o passado recente trouxe uma forte tendência ao desenvolvimento das ditas redes definidas por software, um novo paradigma tecnológico que propõe o uso de soluções abertas e flexíveis, visando à interoperabilidade dos diversos elementos físicos que compõem uma rede de telecomunicações [3] (tendência 4 no H1).

O desenvolvimento de tais padrões aumenta a competitividade no setor, permitindo que as operadoras de redes de telecomunicações tenham maior facilidade de atualização e operação de suas redes, inclusive interconectando equipamentos de diferentes fabricantes. Para tanto, diversos órgãos e fóruns têm gerado intensas discussões para a

padronização dos diferentes elementos e protocolos que vão compor as futuras gerações das redes ópticas de longa distância [4], contando com contribuições dos diversos atores do setor de telecomunicações, de modo a equalizar os anseios e as demandas de cada parte interessada, incluindo fabricantes, integradores e operadores de tais redes.

3. REDES DE CONEXÃO AO USUÁRIO FINAL

Apesar de já ser a solução preferencial para suportar a conectividade de longo alcance há várias décadas, a chegada de fibra óptica até a casa do usuário final foi uma solução que ganhou tração comercial posteriormente, especialmente considerando os custos envolvidos e a realidade geográfica e econômica de países como o Brasil. Entretanto, já nas últimas décadas, verificou-se uma forte expansão de tal mercado, inicialmente cobrindo os principais centros urbanos e, posteriormente, expandindo-se por todo o país – um processo que continua aquecido atualmente. De todo modo, com a crescente demanda por conexão de banda larga, especialmente com a popularização do consumo de mídia de alta resolução, jogos eletrônicos e constante conexão com a Internet, o mercado passou a exigir o desenvolvimento e a instalação de redes de maior capacidade. Isso fez com que, gradualmente, as soluções ópticas passassem a ser mais atrativas do ponto de vista comercial, bem como impulsionou a adoção de novas tendências tecnológicas conforme explicitado na Figura 2. De

modo complementar, o constante desenvolvimento e o alto nível de maturidade tecnológica desses sistemas, além da amortização dos custos de desenvolvimento e da otimização dos custos de fabricação e operação em outros cenários de aplicação, possibilitaram uma redução significativa nos custos demandados para sua instalação massificada com a capilaridade exigida pelos grandes centros urbanos. Como consequência, o passado recente trouxe uma crescente popularização de tal solução, tornando usual que fibras ópticas chegassem até a casa dos usuários finais e garantindo conectividade de alta velocidade e estabilidade [5]. Entretanto, tecnologicamente, tais soluções possuem particularidades desenvolvidas, fundamentalmente, como uma forma de reduzir os custos de instalação e operação, dispensando o uso de técnicas de maior complexidade projetadas para redes de transporte de longo alcance e, em consequência, garantindo sua viabilidade em cenários que demandam altíssimos volumes de dispositivos instalados em campo. Adicionalmente, por ser uma solução de alta capilaridade e baixo custo, o uso de tais redes ópticas tem sido considerado também como solução preferencial para o fornecimento da infraestrutura básica para as redes móveis de quinta e, futuramente, sexta geração, trazendo novas demandas técnicas e econômicas para o setor.

Em tal contexto, historicamente, as redes ópticas destinadas a fornecer conectividade ao usuário final foram baseadas no uso de técnicas de menor complexidade para a geração e recepção de dados, permitindo a conexão de diversos clientes com base na alocação de um intervalo temporal específico para sua comunicação [6]. Entretanto, tal abordagem traz duas limitações fundamentais para sua evolução: em primeiro lugar, as técnicas até então utilizadas estão próximas de atingir

sua máxima capacidade de transmissão; em segundo lugar, o uso de intervalos temporais para a comunicação de cada usuário incorre em um aumento na latência para troca de dados. Dessa forma, de modo a continuar a suportar as futuras redes de telecomunicações, fornecendo conectividade com a qualidade demandada por novas aplicações, com especial destaque para as redes móveis, faz-se necessário o desenvolvimento de uma nova geração de redes ópticas destinadas a tal aplicação, a qual deverá ser baseada em novos paradigmas tecnológicos. De modo similar ao observado no passado, é esperado que as tecnologias que venham a suportar tais redes sejam baseadas na redução da complexidade e dos custos das soluções já desenvolvidas anteriormente para as redes ópticas de mais longo alcance. Dessa forma, de modo análogo à análise anterior de tal cenário, as soluções a serem desenvolvidas deverão explorar, simultaneamente, o desenvolvimento de equipamentos e dispositivos para a camada física e de protocolos e aplicações para as camadas de controle e gerenciamento de tais redes.

Em específico, a crescente demanda por maiores taxas de transmissão deve impulsionar o desenvolvimento de soluções que operem a taxas de 50 Gb/s (tendência 2 no H1, na Figura 2), 100 Gb/s (tendência 2 no H2) e até 200 Gb/s (tendência 1 no H3) por canal, possivelmente passando a fazer uso de técnicas de modulação em fase e em amplitude com recepção coerente de canais, em contraste com os atuais sistemas baseados unicamente em técnicas de modulação em intensidade com detecção direta (tendência 3 no H2). Entretanto, para isso, o desenvolvimento de novas soluções para a camada física de tais redes deve ter foco na redução da complexidade, custo e consumo

energético dos elementos requeridos para a geração e recepção dos sinais, trazendo ganhos de capacidade de transmissão, em consonância com os requisitos do mercado para sua exploração comercial. Dessa forma, será requerido um especial foco no desenvolvimento de novas tecnologias em integração fotônica (tendência 3 no H1), permitindo a criação de módulos ópticos com maior eficiência energética, menores dimensões físicas e reduzidos custos de fabricação. Adicionalmente, com o aumento das taxas de transmissão requeridas por novas aplicações tecnológicas e a necessidade de levar conectividade a regiões mais afastadas, será inevitável o desenvolvimento de algoritmos de baixa complexidade para a redução do impacto de efeitos degradantes advindos da propagação de tais sinais (tendência 4 no H2), os quais deverão fazer proveito de técnicas previamente desenvolvidas para cenários de maior alcance. Por fim, há uma clara demanda pela redução da latência de conexão (tendência 1 no H1) e, futuramente, pela criação de redes com maiores níveis de interconexão entre os seus elementos, impulsionando a criação de novas soluções e topologias de tais redes, incluindo o uso de multiplexação espectral de canais (tendência 1 no H2), e potencialmente exigindo o uso de técnicas totalmente ópticas para o redirecionamento e chaveamento dos canais ópticos em redes *mesh* (tendência 2 no H3).

De modo complementar, observa-se uma tendência, análoga à observada para cenários de mais longo alcance, para o desenvolvimento de soluções abertas e interoperáveis para as camadas de controle e gerenciamento dos enlaces ópticos (tendência 4 no H1). Em específico, dada a sua alta capilaridade e número massivo de usuários, a integração de soluções inteligentes e autônomas para a

monitoração e o gerenciamento dos recursos da rede se faz fundamental para garantir conectividade estável e aderente aos requisitos de cada aplicação. Para tanto, novamente, é proposto o uso de redes definidas por software como uma ferramenta para garantir a desagregação das camadas da rede óptica, a virtualização da sua infraestrutura e a interoperabilidade entre elementos, que, por sua vez, são disponibilizados por diferentes fabricantes. Novamente, visando definir os padrões mais adequados para tal aplicação, diversos fóruns e grupos de discussão têm proposto diferentes requisitos e protocolos de comunicação para tais redes ópticas, de modo a conciliar os interesses dos diversos atores envolvidos.

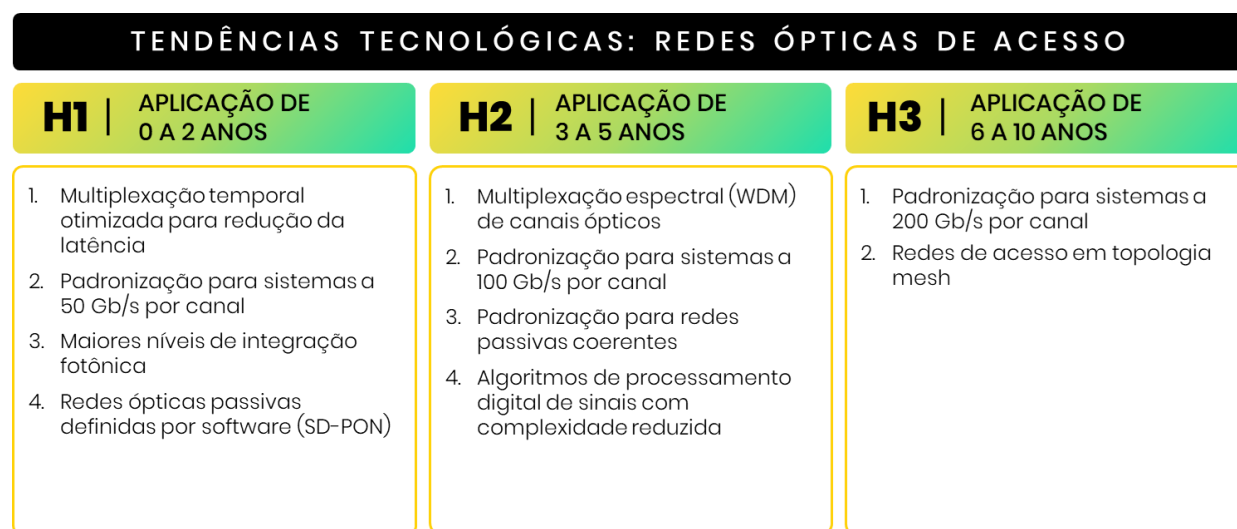


Figura 2 – Tendências tecnológicas para redes de conexão ao usuário final

4. CONVERGÊNCIA DE REDES ÓPTICAS E SEM FIO

Conforme já destacado nas seções anteriores, a evolução das atuais redes móveis também demandará investimentos e o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas para as redes ópticas de comunicação, impulsionando a adoção de novas tendências tecnológicas. De fato, dado o alto volume de dados trafegados pelas redes móveis, toda a infraestrutura para interconexão das antenas às centrais de distribuição dos dados já é feita, atualmente, através do uso de enlaces ópticos de transmissão. Para tanto, é necessário que parte da atual infraestrutura já instalada em campo para interconexão até o usuário final seja reaproveitada para esse fim, permitindo uma significativa redução dos custos de implementação de tais sistemas, uma vez que a realização de obras civis em ambientes urbanos densos costumam ter um custo proibitivo.

Entretanto, conforme já discutido na seção anterior, apesar de sua alta capilaridade, a capacidade das atuais redes ópticas para interconexão até o usuário final já está próxima de seu esgotamento, exigindo investimentos para o desenvolvimento de uma nova geração de enlaces ópticos capaz de suportar conjuntamente as demandas dos usuários finais e das redes móveis. Adicionalmente, dadas suas características particulares, as redes móveis têm demandas específicas que também deverão ser consideradas para o desenvolvimento de tais sistemas ópticos, dentre as quais, destaca-se a necessidade de conexão com baixa latência, especialmente para cenários de aplicação com alta criticidade, como a Indústria 5.0 e a

Saúde 4.0. Dessa forma, os novos enlaces ópticos deverão permitir que a alocação de intervalos temporais para conexão em cada usuário ou antena seja otimizada, a depender da demanda, ou que sejam utilizadas soluções nas quais há dedicação constante de um canal de comunicação para cada usuário, usualmente combinando diversos canais em frequências diferentes.

Adicionalmente, é fundamental que haja um alto nível de integração entre os elementos das redes ópticas e móveis, permitindo a otimização conjunta de sua operação e o desenvolvimento de aplicações capazes de gerenciar de modo efetivo e dinâmico a sua operação, de acordo com as demandas de capacidade e latência de cada usuário. Tal exigência somente será viável através do desenvolvimento de soluções desagregadas e interoperáveis, permitindo a virtualização de toda a infraestrutura e o desenvolvimento de aplicações de controle e monitoramento de toda a complexa infraestrutura demandada para a convergência entre os sistemas ópticos e sem fio da próxima geração.

Por fim, as tendências tecnológicas e de mercado já apontam para as demandas para suportar a sexta geração de redes móveis (6G), as quais deverão ser fundamentalmente marcadas pela possibilidade de compartilhar a transmissão de diversas antenas simultaneamente para fornecer conectividade a um único usuário final.

Dessa forma, a própria topologia das redes ópticas, que atualmente provêm a infraestrutura para as redes 5G, deverá ser alterada, demandando a criação de redes com mais alta capilaridade e com seus diversos nós interconectados em estruturas de alta complexidade. Para que tal arquitetura seja viável, será necessário o desenvolvimento de novos dispositivos ópticos não somente para a geração e recepção

dos canais ópticos com alta capacidade e baixo custo, mas também para o roteamento e chaveamento dos canais, preferencialmente de maneira completamente óptica, dentro dessa estrutura. Dada a complexidade de tal aplicação, o uso de inteligência artificial também será fundamental para o controle e gerenciamento dos recursos de tais redes, potencialmente demandando a implementação de aplicações na própria borda dos sistemas e técnicas para o seu constante monitoramento e otimização.

5. COMUNICAÇÕES MAIS SEGURAS

Os sistemas de informação são amplamente utilizados em muitos aspectos de nosso cotidiano, tendo como efeito secundário o surgimento de uma variedade de problemas de segurança da informação com ameaças à privacidade dos dados dos usuários. A segurança das informações confidenciais transmitidas pela Internet tornou-se uma questão significativa, que tem despertado cada vez mais atenção em diversos setores.

Em específico, o desenvolvimento de computadores quânticos têm criado uma expectativa de obsolescência dos sistemas criptográficos convencionais dado seu maior poder computacional [7]. Consequentemente, há uma necessidade urgente de conceber soluções poderosas de segurança da informação para se proteger contra os novos ataques cibernéticos, incluindo a criptografia por troca de chaves quânticas e algoritmos criptográficos pós-quânticos. Dessa

forma, a criptografia quântica tornou-se um tema de interesse nacional, incentivando vários países a trabalhar ativamente no desenvolvimento de seus próprios produtos e redes, a fim de reduzir a dependência de soluções estrangeiras, e no desenvolvimento de novas tendências tecnológicas, conforme apresentado na Figura 4.

A criptografia quântica [8] é capaz de alcançar a segurança teórica da informação explorando os princípios da física quântica, como exemplificado pelo teorema quântico de não clonagem e o princípio da incerteza de Heisenberg. Sua segurança permanece indestrutível mesmo diante de futuros avanços do poder computacional ou dos algoritmos. Como uma das aplicações mais bem-sucedidas da criptografia quântica, a distribuição de chaves quânticas (QKD) [9] possibilita a criação de técnicas de criptografia teoricamente seguras e é baseada nas leis da física quântica para distribuir chaves secretas simétricas entre um par de partes legítimas. Essas chaves secretas podem então ser usadas por sistemas criptográficos de chave simétrica para criptografar mensagens confidenciais a serem transferidas por um canal público. De forma mais ampla, a rede QKD pode ser usada para proteger vários aplicativos nas áreas de finanças e bancos, governo e defesa, nuvem e centrais de dados, infraestrutura crítica, assistência médica, entre outras.

Os elementos básicos de QKD são o transmissor e o receptor QKD conectados por meio de um enlace QKD, permitindo que duas partes legítimas compartilhem as chaves secretas de maneira ponto a ponto. Nos últimos anos, os enlaces QKD ponto a ponto fizeram progressos significativos em termos de protocolos, dispositivos e sistemas, contando com várias demonstrações em fibras fazendo uso de canais

multiplexados em frequência e fibras especiais, bem como de transmissões por satélites de tecnologia quântica [9]. Adicionalmente, uma variedade de protocolos e dispositivos QKD foram desenvolvidos para melhorar o desempenho de QKD quantificado em termos de taxa da chave secreta, distância e segurança. No entanto, os enlaces QKD ponto a ponto inicialmente estudados e testados suportaram apenas alguns pares de transmissores e receptores, o que restringiu a sua popularidade. Dada essa motivação, várias redes QKD baseadas em fibra foram implantadas em campo (Figura 3), como DARPA, SECOQC, Tóquio, SwissQuântico, Pequim-Xangai e Cambridge [9]. Além disso, uma demonstração de rede QKD intercontinental baseada em satélite e uma rede QKD espaço-terra [9] foram testadas.

Visando à validação de tal tecnologia, algumas tecnologias quânticas foram implementadas rapidamente pela indústria nas últimas duas décadas [9]; no entanto, o uso de QKD no mercado ainda é limitado, pois várias barreiras impedem a transferência industrial da criptografia clássica para a criptografia quântica [10].

Atualmente os dispositivos QKD geralmente incluem uma mesa óptica, detectores de fio supercondutores, fontes de fótons únicos e óptica de precisão. Estes elementos ainda requerem um alto investimento, extensa e constante manutenção e podem ser operados apenas por especialistas treinados [10]. Portanto, a implantação prática de QKD, especialmente em enlaces de longa distância (tendência 1 no H1), ainda apresenta muitos desafios industriais, demandando o aperfeiçoamento e a disponibilização comercial de elementos: fontes ópticas de fóton único, detectores de fóton único, detectores homódinos e heteródinos de baixo ruído e repetidores quânticos (tendência 2 no H2).

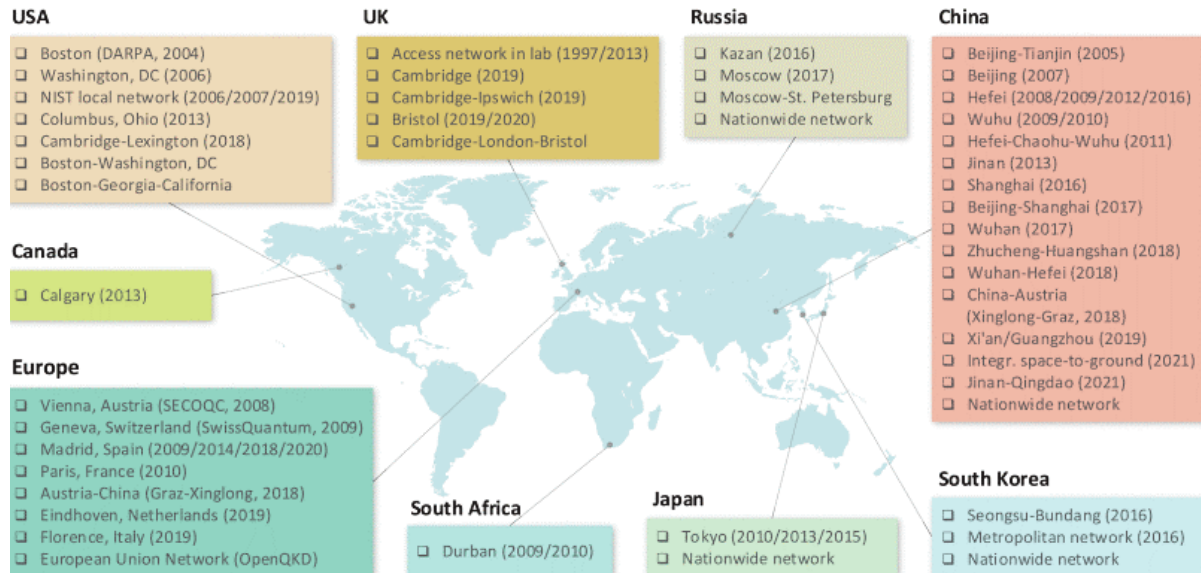


Figura 3 – Exemplos de redes QKD testadas no mundo [9]

Por fim, para avançar para a futura implantação comercial de redes QKD, um extenso processo de padronização desses elementos é necessário [10] (tendência 1 no H2), potencialmente incentivando o surgimento de novos fornecedores e aumentando a competitividade no setor (tendência 2 no H1).

Atualmente, várias atividades de padronização em tecnologias quânticas estão em andamento em todo o mundo [11]. Embora haja sobreposição em certas áreas, outras áreas desse amplo campo tecnológico não estão sendo abordadas. Uma abordagem coordenada será altamente benéfica para liberar todo o potencial da padronização para acelerar o progresso (tendência 1 no H3), mesmo porque o grupo de especialistas em padronização disponíveis para tecnologias quânticas ainda é muito limitado.

Além disso, nem todas as áreas ainda estão prontas para a padronização, ou seja, enquanto, em algumas áreas, a padronização precoce é capaz de impulsionar o progresso, ela pode também ser um limitante para outras aplicações.

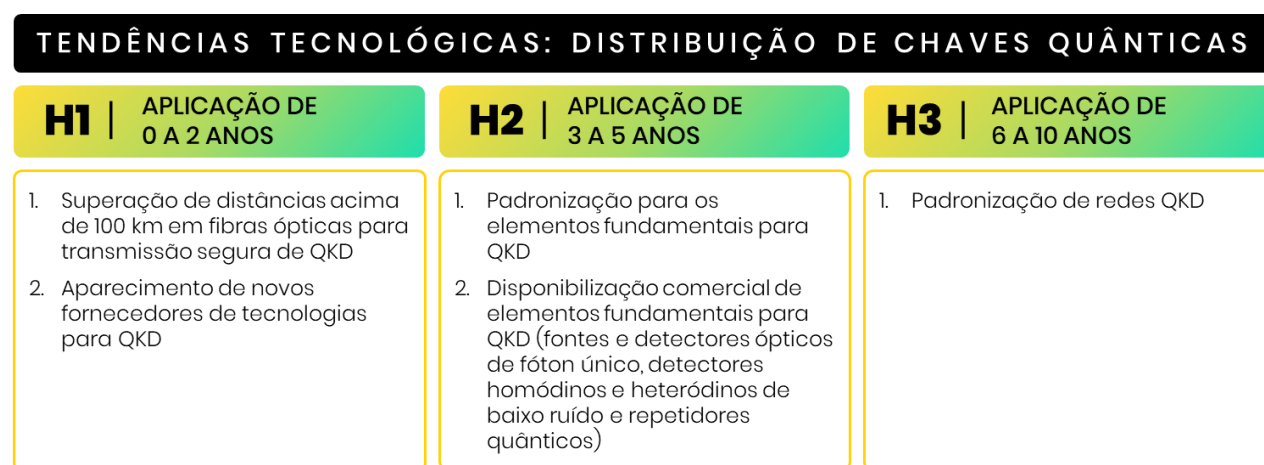


Figura 4 – Tendências tecnológicas para comunicações mais seguras

6. CONECTIVIDADE SIGNIFICATIVA

O conceito de conectividade significativa implica prover acesso à Internet de forma segura, confiável e de qualidade, permitindo que todas as pessoas tenham uma experiência digital satisfatória e produtiva [12]. Em pleno início da década de 2020, é alarmante constatar que mais de um terço da população mundial, aproximadamente 2,7 bilhões de pessoas, ainda permanece desconectada [13].

Já no Brasil, ainda existem 15 milhões de residências sem acesso à Internet, com 62% dos usuários brasileiros acessando a rede exclusivamente por meio de smartphones, de modo que o uso da Internet apenas pelo celular é predominante entre as mulheres (64%), pretos (63%), pardos (67%) e indivíduos pertencentes às classes sociais D e E (84%) [14][15]. Adicionalmente, um relatório mais recente indica que mais de metade da população brasileira ainda não tem acesso a recursos que permitam seu enquadramento em um cenário de conectividade significativa, situação agravada também por disparidades regionais, raciais e etárias [16].

Os dados apresentados ressaltam a enorme disparidade na inclusão digital, demonstrando como grupos específicos da população ainda enfrentam maior dificuldade no acesso à conectividade significativa e, conseqüentemente, à inclusão social e econômica.

A conectividade significativa abrange não apenas a disponibilidade de conexão, mas também a capacidade de utilizá-la de forma eficaz para melhorar a vida cotidiana. No entanto, enfrentamos desafios importantes para alcançar a conectividade significativa para todos, incluindo lacunas em infraestrutura, renda, conteúdo e habilidades digitais. Em tal contexto, as lacunas de infraestrutura se concentram em desafios para conectar áreas rurais, periferias e pequenas cidades, regiões que ainda não possuem uma infraestrutura adequada, como redes de acesso e transporte, dificultando o acesso à Internet de qualidade da população nessas áreas.

De modo complementar, temos também lacunas de renda, uma vez que muitas pessoas não têm recursos financeiros para contratar planos de Internet ou adquirir dispositivos para acessá-la. Essa situação gera uma

divisão digital, na qual uma parcela da população não consegue desfrutar dos benefícios da conectividade devido à falta de renda suficiente. Por fim, a lacuna de habilidades digitais também é um obstáculo importante, uma vez que não basta apenas ter infraestrutura e acesso à Internet, é necessário possuir conhecimentos e habilidades para utilizar a tecnologia de forma adequada e produtiva. Muitas pessoas enfrentam dificuldades para se familiarizar com as ferramentas digitais e aproveitar plenamente as oportunidades que a conectividade oferece.

Para superar esses desafios, é necessário um esforço conjunto do governo, do setor privado e da sociedade civil, incluindo o levantamento de indicadores significativos para mensurar a qualidade de acesso à Internet da população e o seu posterior monitoramento, permitindo a criação de programas que tornem o país uma referência internacional em conectividade significativa. Políticas públicas e regulamentações adequadas devem ser implementadas para promover o investimento em infraestrutura, especialmente em áreas menos atendidas.

Também é fundamental criar programas de inclusão digital, capacitando as pessoas com habilidades digitais e promovendo a alfabetização digital em todas as faixas etárias.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual panorama tecnológico demonstra de modo claro e evidente a importância social, econômica e estratégica que as tecnologias de conectividade ganharam nas últimas décadas. Dessa forma, conforme discutido ao longo do presente documento, é natural que as Comunicações Ópticas, elementos centrais para fornecer a infraestrutura básica da rede global de telecomunicações, sejam atualmente um setor de extremo interesse industrial e comercial, demandando um contínuo processo de desenvolvimento tecnológico para suportar o contínuo surgimento de novos paradigmas tecnológicos. Em tal contexto, o estudo do atual cenário mercadológico e tecnológico permitiu a identificação das principais tendências para o setor, permitindo que um roadmap tecnológico seja estruturado e, conseqüentemente, ações estratégicas possam ser definidas para garantir a competitividade e soberania tecnológica do Estado brasileiro no setor. Adicionalmente, é fundamental destacar o papel social da conectividade, a qual, se fornecida com qualidade e estabilidade, é uma ferramenta central para garantir a inserção social e econômica de uma parcela significativa da população brasileira.

Com tal objetivo, o estudo aqui reportado propôs uma análise tecnológica e comercial acerca do desenvolvimento contínuo de soluções em Comunicações Ópticas, e sua convergência com as redes móveis, nos seus principais cenários de aplicação. Em específico, para fornecer conectividade em enlaces de longa distância, percebe-se uma contínua tendência ao uso de soluções tecnológicas de maior complexidade e custo, impulsionando o constante desenvolvimento do

atual estado da arte. Em contraste, as redes de menor alcance e maior capilaridade, como é o caso de enlaces de conexão até o usuário final, demandam o desenvolvimento de soluções com custo e consumo energético reduzidos, exigindo uma maior competitividade comercial em um cenário mais pulverizado. Tais tecnologias também devem ser exploradas como ferramentas para fornecer a infraestrutura demandada pela quinta (5G) e, futuramente, sexta geração (6G) das redes móveis, devendo também atender aos seus requisitos de capacidade e latência, convergindo para redes de conectividade capazes de operar de modo eficiente e otimizado em seus mais diversos domínios. Para tanto, é fundamental o desenvolvimento das ditas redes definidas por software, as quais permitem maior competitividade, flexibilidade operacional e interoperabilidade para as redes ópticas em seus mais diversos setores de aplicação. Por fim, o recente surgimento da computação quântica, como uma potencial solução tecnológica viável em um futuro próximo, vem impulsionando o desenvolvimento da criptografia quântica como uma ferramenta fundamental para garantir a segurança das informações trafegadas na rede global de telecomunicações.

8. ATUAÇÃO DO CPQD EM CONECTIVIDADE

O CPQD é uma organização reconhecida por sua longa trajetória e experiência em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias da informação e comunicação. Sua atuação é fundamental para impulsionar o avanço das tecnologias de transmissão óptica e sem fio e para promover a conectividade significativa em nosso país.

Em relação às redes de transporte, acesso e convergência com redes móveis, o CPQD possui conhecimentos especializados que possibilitam a criação de novas tecnologias e soluções capazes de atender até mesmo os requisitos mais desafiadores diante do crescente tráfego de dados em nossas redes. Isso significa que o CPQD pode atuar como parceiro tecnológico no desenvolvimento de soluções inovadoras para tornar as redes mais eficientes, confiáveis e acessíveis, com tecnologia nacional.

No que diz respeito à promoção da conectividade significativa, o CPQD pode atuar como parceiro do Estado, auxiliando no desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a expansão e melhoria da infraestrutura de comunicações, assim como na criação de programas que visem ao desenvolvimento de habilidades digitais em todas as camadas da sociedade, ajudando, dessa forma, a impulsionar a inclusão digital e o desenvolvimento social e econômico do país, e garantindo que todos os cidadãos tenham acesso equitativo às oportunidades oferecidas pela conectividade.

9. REFERÊNCIAS

- [1] Okamoto, S.; Minoguchi, K.; Hamaoka, F.; Horikoshi, K.; Matsushita, A.; Nakamura, M.; Yamazaki, E.; Kisaka, Y. **A Study on the Effect of Ultra-Wide Band WDM on Optical Transmission Systems**. *Journal of Lightwave Technology*, v. 38, n. 5, p. 1061-1070, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2962178>>.
- [2] Rademacher, G.; Luís, R. S.; Puttnam, B. J.; Ryf, R.; van der Heide, S.; Eriksson, T. A.; Fontaine, N. K.; Chen, H.; Essiambre, R.-J.; Awaji, Y.; Furukawa, H. **High Capacity and Long-Haul Transmission with Space-Division Multiplexing**. In: 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2021, p. 1-3. Disponível em: <<https://doi.org/10.1364/OFC.2021.W7D.1>>.
- [3] Casellas, R.; Martinez, R.; Vilalta, R.; Munoz, R.; Gonzalez-Muniz, A.; de Dios, O. G.; Fernandez-Palacios, J.-P. **Advances in SDN control and telemetry for beyond 100G disaggregated optical networks [Invited]**. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 14, n. 6, 2022, p. C23-C37. Disponível em: <<https://doi.org/10.1364/JOCN.451516>>.
- [4] Gass, K. **OIF Update! Defining 800ZR, 800LR, and Random 400ZR Information**. In: 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), 2022. Disponível em: <<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/ECOC-2022-Market-Focus-Gass-final1.pdf>>.
- [5] FTTH Council. **Everything You Need To Know About FTTH**. Disponível em: <<https://www.ftthcouncil.eu/knowledge-centre/what-is-ftth>>.
- [6] Harstead, E.; van Veen, D.; Houtsma, V.; Dom, P. **Technology Roadmap for Time-Division Multiplexed Passive Optical Networks (TDM PONs)**.

Journal of Lightwave Technology, v. 37, n. 2, p. 657–664, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2881933>>.

[7] Ministry of the Interior and Kingdom Relations. **Prepare for the threat of quantum computers**. Disponível em:

<<https://english.aivd.nl/binaries/aivd-en/documenten/publications/2022/01/18/prepare-for-the-threat-of-quantumcomputers/Prepare+for+the+threat+of+quantumcomputers.pdf>>.

[8] National Security Agency. **Quantum Key Distribution (QKD) and Quantum Cryptography (QC)**. Disponível em:

<<https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/>>.

[9] Y. Cao, Y. Zhao, Q. Wang, J. Zhang, S. X. Ng and L. Hanzo, "The Evolution of Quantum Key Distribution Networks: On the Road to the Qinternet," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 2, pp. 839–894, Secondquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3144219.

[10] Liu, R., et al.: Towards the industrialisation of quantum key distribution in communication networks: a short survey. IET Quant. Comm. 3 (3), 151–163 (2022). Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/qtc2.12044>>.

[11] CEN-CENELEC Focus Group on Quantum Technologies (FGQT), "Standardization Roadmap on Quantum Technologies", Abril, 2023. Disponível em: <<https://www.cencenelec.eu/news-and-events/news/2023/brief-news/2023-03-22-standardization-for-quantum-technologies/>>.

[12] ITU. Universal & Meaningful Connectivity. Disponível em:

<<https://www.itu.int/itu-d/sites/projectumc/home/aboutumc/>>.

[13] ITU. Facts and Figures 2022. Disponível em: <<https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/facts-figures-2022/>>.

[14] VASCONCELOS, E. Celular é único meio de acesso à internet para 62% dos brasileiros. Disponível em: <<https://www.telesintese.com.br/celular-e-unico-meio-de-acesso-para-62-usuarios-de-internet-no-brasil/>>.

[15] Cetic.br. TIC Domicílios - 2022. Disponível em: <<https://cetic.br/pt/tics/domicilios/2022/domicilios/>>.

[16] CGI.br. CONECTIVIDADE SIGNIFICATIVA: propostas para medição e o retrato da população no Brasil - 2024. Disponível em: <https://cgi.br/media/docs/publicacoes/7/20240415183307/estudos_setoriais-conectividade_significativa.pdf/>.



Sua **conexão**
com o futuro.

WWW.CPQD.COM.BR