

1. Introdução

Um sistema de comunicação pode ser em geral definido como aquele que faz a transferência de informação de um lugar para outro. A transferência é usualmente atingida pela modulação da informação sobre uma onda eletromagnética, a qual atua como o sinal portador. Esse portador modulado é assim transmitido ao destino desejado onde é recebido e o sinal de informação obtido através da demodulação. Sofisticadas técnicas tem sido desenvolvidas com esse objetivo, baseadas em portadoras eletromagnéticas, operando em bandas como as de rádio, ondas milimétricas e microondas. No entanto a comunicação pode também ser obtida usando um sinal portador dentro da banda das frequências ópticas: ~ 100 THz, dando lugar aos sistemas de comunicações ópticas.

Os sistemas de comunicações por fibra óptica começaram a ser implantados desde os anos 80 revolucionando de fato as telecomunicações [1]. O setup geral destes sistemas é similar, em termos básicos, a qualquer tipo de sistema de comunicações, como apresentado na Figura 1.1a [2].

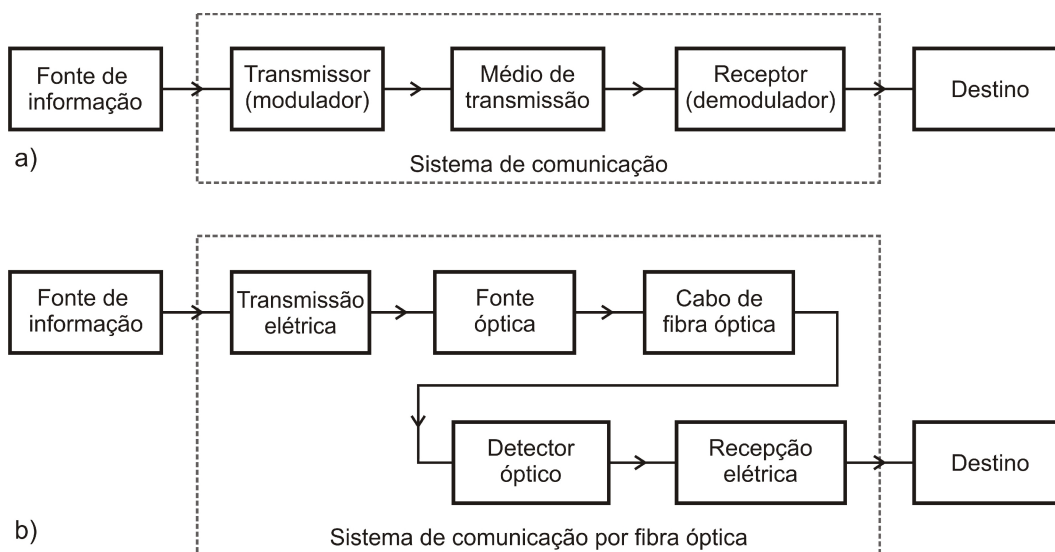


Figura 1.1 a) Um sistema de comunicação básico. b) Sistema de comunicação por fibra óptica. [2].

Um sistema de comunicação consiste de um transmissor ou modulador ligado a uma fonte de informação, um meio de transmissão e um receptor ou demodulador no destino. No caso dos sistemas baseados em fibras ópticas, na Figura 1.1b. A fonte de informação fornece um sinal elétrico para o transmissor, compondo um estágio elétrico, o qual modula uma portadora óptica. O meio de transmissão consiste de um cabo de fibra óptica e, o receptor de um fotodetector acionando um segundo estágio elétrico provindo a demodulação da portadora.

Na atualidade os sistemas de comunicação por fibra óptica são a tecnologia por excelência em muitas aplicações incluindo a transmissão de dados, voz, vídeo e telemetria tanto em redes de curta distância, como as redes de acesso, e redes de longa distância de alcance intercontinental. Sendo a única técnica capaz de acompanhar o crescimento exponencial na demanda de comunicação global, alcançando, nos dias de hoje, ao usuário final com as redes de banda larga FTTH (*Fiber To The Home*) [3].

As redes de acesso tipo FTTx (H= *Home*, B=*Building*, C=*Curb* e N=*Node*) estão sendo implantadas em muitos países, assim é esperado que o mercado de redes de banda larga ultra rápida, como FTTH/B (*Fiber To The Home/Building*) em conjunto com VDSL (*Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line*), tenha um crescimento estável, já alcançando quase 200 milhões de assinantes em todo o mundo para o ano de 2016 [4]. A arquitetura dominante nesse sentido são as redes PON: *Passive Optical Network*, basicamente as TDM-PON (*Time Division Multiplexing - PON*). As novas gerações de redes PON denominadas NG-PON (*Next Generation PON*) utilizarão arquiteturas híbridas TDM/WDM-PON ou plenamente WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing PON*).

Na arquitetura PON a supervisão da camada física da rede é muito importante, a motivo principal é que as camadas superiores da NMS (*Network Management System*) ainda não tem uma visibilidade completa, fazendo com que uma falha somente seja visível para a rede quando o serviço cai gerando perdas diretas e indiretas para o usuário e para a operadora [5]. Numa rede WDM-PON onde são transmitidas taxas muito altas de bits (e.g. 10 Gb/s) o problema é ainda maior dado que a queda de uma fibra pode implicar na suspensão de serviços de muitos usuários.

Um método muito conhecido na área de supervisão de redes ópticas é a Reflectometria. A reflectometria é um método não invasivo que permite a análise das propriedades de um meio baseado na reflexão de ondas produzidas nas interfaces de interesse dentro desse meio. Basicamente existem duas técnicas: a reflectometria no domínio do tempo (TDR) e a reflectometria no domínio da frequência (FDR). Contudo a OTDR é a técnica mais amplamente usada em redes de fibra óptica através do Refletômetro Óptico no Domínio do Tempo (*Optical Time Domain Reflectometer*: OTDR [6]).

A maioria dos OTDRs comerciais são baseados em fotodetectores de avalanche (APD) lineares. Assim as duas características mais relevantes de um OTDR, a resolução espacial e a faixa dinâmica, tem uma relação de compromisso: já que para alcançar distâncias maiores é necessário pulsos ópticos mais largos o que leva a uma degradação da resolução [1], [7]. Com o desenvolvimento do modo de operação pulsado Geiger dos APDs o OTDR por contagem de fótons únicos (v-OTDR) foi proposto [8]. Tais dispositivos oferecem alta sensibilidade [9], onde o compromisso entre a resolução e a faixa dinâmica é superado.

Um diagrama básico de aquisição por contagem de fótons é apresentado na Figura 1.2, [10]. Uma arquitetura típica usa um conversor digital de tempo (Time to Digital Converter – TDC) e uma memória da qual um histograma do número de fótons versus os tempos de chegada pode ser gerado.

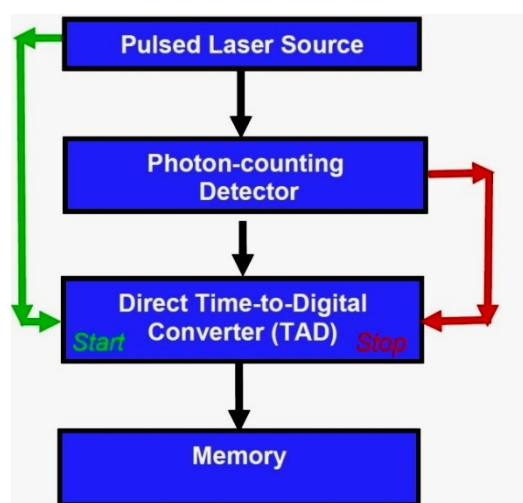


Figura 1.2 Montagem básica de um sistema de aquisição por contagem de fótons [10]

1.1. Motivação

As primeiras aplicações dos sistemas de fibra óptica foram principalmente enlaces de longa distância pelo fato de seus componentes serem caros e complexos, tornando-os economicamente inviáveis em redes de curta distância. Contudo, no final dos anos 90, com o avanço na tecnologia optoeletrônica, os custos na implementação e manutenção de redes ópticas de curto alcance já eram comparáveis às das redes de cobre [11].

Atualmente sistemas de comunicação óptica de curto alcance estão sendo aplicados em redes tais como as redes de área local ópticas (POLAN: *Passive Optical Local Area Network*) [12], redes ópticas na aeronáutica (AirPON : *AIRcraft Passive Optical Network*) [13] [14], em redes de sensores de fibra óptica (OFS-N: *Optical Fiber Sensor - Network* [15]) e em redes super compactas envolvidas na interligação de processadores de alta velocidade (FC: *Fiber Channel*).

Passive Optical LANs é uma plataforma que usa o padrão FTTH baseado na tecnologia PON reduzindo custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX) e melhorando ainda a disponibilidade e confiabilidade das redes LAN. Uma configuração básica pode conectar 32 dispositivos (ONTs: *Optical Network Terminal*), através de um divisor passivo, até um terminal (OLT: *Optical Line Terminal*) que é o centro da rede LAN. O divisor passivo permite a comunicação bidirecional dividindo o sinal de *downstream* e combinando os sinais de *upstream*. O grande número de aplicações baseadas em POLANs a coloca como uma das maiores tendências em redes de área local e a sua comercialização se projeta com um crescimento anual de 19,2% entre 2014 e 2020 [4].

Por outro lado varias soluções para redes ópticas em aviação vem sendo propostas, uma das mas promissoras é a chamada Air-PON [14]. Nestas aplicações fatores como o peso, espaço, consumo de energia e monitoramento são cruciais, tendo em conta que a rede ainda é submetida a condições extremas como variações de temperatura e vibrações. Além da rede óptica oferecer serviços básicos de entretenimento (Internet, HD-TV e áudio digital) ela deve ter

capacidade para interconectar o sistema de controle e monitoramento de sensores com os sistemas de processamento de alta performance [16].

O sensoriamento remoto baseado em fibras ópticas tem recebido uma grande atenção nestes últimos anos devido a sua ampla gama de aplicações para o monitoramento de um grande número de variáveis. As redes de sensores de fibra óptica (OFS-N) representam um significativo aprimoramento sobre redes de sensores tradicionais garantindo aplicações como monitoramento estrutural em grande escala incluindo obras civis como pontes e estruturas metálicas, segurança, redes de instrumentação industrial, entre outras [15]. Contudo um dos grandes desafios das redes OFS-N é o incremento do número de sensores que podem ser multiplexados numa mesma rede garantindo a qualidade do sinal. Neste sentido a multiplexação por comprimento de onda (WDM) é um dos melhores métodos propostos.

Outra grande área nas redes ópticas de curto alcance são as chamadas *Fiber Channel* (FC). FC é uma tecnologia de comunicação de alta velocidade que é utilizada no armazenamento de dados em redes (SANs: *Storage Area Networks*) e na interligação de processadores de altíssima velocidade em supercomputadores. A FC possui um protocolo de transporte parecido ao TCP (*Transmission Control Protocol*) transportando predominantemente comandos SCSI (*Small Computer System Interface*) sobre a fibra. A mais recente geração da FC, Gen 6 FC, oferece velocidades de transmissão *full-duplex* de até 204.8 Gb/s [17].

1.2. Organização desta tese

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de dois reflectômetros por contagem de fótons no domínio do tempo para o monitoramento de fibras ópticas.

O segundo capítulo descreve os aspectos teóricos mais relevantes. É dada uma descrição resumida a respeito das fontes laser, fibras ópticas, e o reflectômetro óptico no domínio do tempo, além de serem apresentadas as redes ópticas passivas.

O terceiro capítulo faz uma descrição da tecnologia atual, mostrando o estado da arte para a detecção de fótons únicos. Parâmetros como a eficiência quântica, ruído de escuro e *afterpulse* são expostas. São discutidos também os esquemas de gatilhamento dos fotodiodos de avalanche e as técnicas para interromper a avalanche após um fóton ser detectado.

A descrição detalhada dos reflectômetros desenvolvidos são apresentadas no quarto capítulo. São expostos a montagem física dos equipamentos e instrumentação assim como o software de aquisição e controle. Foram desenvolvidos dois reflectômetros: o primeiro foi projetado com ênfase na faixa dinâmica e o segundo com ênfase na resolução espacial.

O quinto capítulo expõe os resultados experimentais. O monitoramento de uma rede WDM-PON sob tráfego de dados e o monitoramento de uma rede TDM-PON de curto alcance são demonstrados. O fenômeno, chamado nesta tese, de *reflexão por curvatura* é caracterizado e é proposto um modelo descritivo deste comportamento baseado na variação dos parâmetros físicos das fibras ópticas quando submetidas a uma curvatura. Finalmente é feita a caracterização de uma rede de Bragg dispersiva onde a resposta espectral, a dispersão cromática induzida e o comprimento físico da rede são medidos.