



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Trabalho de Graduação em Engenharia da Computação

**Redes Óticas de Acesso de Banda Ultra
Larga: Conservação de Potência em OLTs
na arquitetura TWDM-PON**

Thiago Sepulveda Suzart

Trabalho de Graduação

Recife

7 de Março de 2014

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Thiago Sepulveda Suzart

Redes Óticas de Acesso de Banda Ultra Larga: Conservação de Potência em OLTs na arquitetura TWDM-PON

Trabalho apresentado ao Programa de Trabalho de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: *Prof. Dr. Divanilson Rodrigo de Souza Campelo*

Recife

7 de Março de 2014

*Dedico este trabalho a todos que durante minha
graduação deram apoio para a realização de um sonho.*

Agradecimentos

Agradeço acima de tudo a Deus por sempre está presente em minha vida.

A toda minha família, minha mãe, Ana Rita, por proporcionar o sustento econômico durante minha graduação, e em especial, a minha irmã, Larissa, que colaborou bastante com parte escrita deste projeto que aqui apresento.

A minha namorada, Marina, por sempre ter me apoiado.

Aos professores, Dr. Carlos Alexandre, Dr. Daniel Cunha, Dr. Hélio Magalhães e Dr. Odilon Maroja, por sempre desempenharem seus trabalhos com bastante ânimo, desta forma me estimulando a alcançar meu objetivo. Em especial ao professor Dr. Divanilson Campelo, que me orientou durante meu Trabalho de Graduação.

Aos meus amigos de faculdade, com os quais convivi toda minha graduação.

E por fim, a todos os funcionários do Centro de Informática.

Inventar é imaginar o que ninguém pensou; é acreditar no que ninguém jurou; é arriscar o que ninguém ousou; é realizar o que ninguém tentou.

Inventar é transcender.

—SANTOS DUMONT (1873 - 1932)

Resumo

A eficiência energética ganhou destaque nas arquiteturas de rede de acesso devido ao alto consumo associado a elas. Dentro da rede de acesso, as arquiteturas que utilizam fibra óptica, na forma de rede óptica passiva (PON), estão cada vez mais sendo utilizadas por apresentarem alta largura de banda. A FSAN selecionou a *Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network* (TWDM-PON) como solução para NG-PON2. Recentemente, foi proposto um mecanismo de migração das *Optical Network Units* (ONU) na TWDM-PON a fim de reorganizar as ONUs no menor número de pares de comprimentos de ondas possível e desligar os demais. Nesse trabalho, foi desenvolvido um simulador para estudar o quanto de energia é economizada utilizando o agrupamento das ONUs e o impacto que as migrações realizam no *Service Level Agreement* (SLA) do usuário. Simulando o perfil de tráfego de rede da cidade de Davis-Califórnia, com várias configurações TWDM-PON, encontramos um eficiência energética de 50% nos blocos de transmissão e recepção do OLT à um custo de 0,3% no SLA.

Palavras-chave: *Next-generation passive optical network stage 2* (NG-PON2), *Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network* (TWDM-PON), *Service Level Agreement* (SLA), eficiência energética.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Definição do Problema e Objetivos	2
1.3	Resultados Alcançados	3
1.4	Organização do Trabalho Escrito	3
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Introdução	5
2.2	Rede de Acesso	5
2.3	PON - Rede Ótica Passiva	6
2.3.1	G-PON	7
2.3.2	XG-PON	8
2.4	Eficiência Energética em PONs	8
2.4.1	Deep Sleep Mode	9
2.4.2	Cyclic Sleep Mode	9
2.4.3	Doze Mode	9
2.5	NG-PON2	10
2.5.1	WDM-PON	10
2.5.2	OFDM-PON	11
2.5.3	TWDM-PON	13
2.6	Eficiência Energética em TWDM-PON	14
3	Desenvolvimento	15
3.1	Introdução	15
3.2	Metodologia	16
3.3	Impacto na Rede	17
3.4	Simulação	17

4	Resultados	19
4.1	Introdução	19
4.2	Primeira Simulação	20
4.3	SLA com diferentes Tempos de Migrações	22
4.4	Eficiência Energética com diferentes Tempos de Migrações	25
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	27
A	Lista de Acrônimos	29

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura da rede PON, imagem retirada em [7]	7
2.2	Alcance diferencial de uma rede GPON, imagem retirada em [7]	8
2.3	Arquitetura básica dos componentes da rede WDM-PON, imagem retirada em [1]	11
2.4	Divisão do espectro total de frequência em vários intervalos menores, de forma que a reposta destes intervalos se comportem de maneira linear, técnica dividir para conquistar	12
2.5	Arquitetura básica dos componentes da rede TWDM-PON, imagem retirada em [9]	13
3.1	(a) procedimento de migração da ONU, (b) gerenciamento de migração da OLT, imagem retirada em [12]	16
4.1	Configuração e Resultados da primeira simulação	22
4.2	Quantidade de ONUs ativas durante um dia de simulação	23
4.3	Quantidade de pares de comprimentos de ondas ativos durante um dia de simulação	23
4.4	SLA das 64 ONUs	24
4.5	Função do SLA versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 4 pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações	24
4.6	Função do SLA versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 8 pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações	25
4.7	Função da Eficiência versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 4 Pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações	26
4.8	Função da Eficiência versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 8 Pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações	26

Lista de Tabelas

2.1	Consumo energético nos modos de operações da ONU	10
3.1	Porcentagem de ONUs desligadas durante diferentes horas do dia	17
4.1	Configuração da TWDM-PON para primeira simulação	19
4.2	Configuração da TWDM-PON com 4 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,1 segundos	19
4.3	Configuração da TWDM-PON com 4 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,05 segundos	20
4.4	Configuração da TWDM-PON com 4 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,01 segundos	20
4.5	Configuração da TWDM-PON com 8 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,1 segundos	21
4.6	Configuração da TWDM-PON com 8 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,05 segundos	21
4.7	Configuração da TWDM-PON com 8 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,01 segundos	22

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Contextualização

Uma das grandes preocupações deste século é com o consumo energético mundial, visto que, energia é o combustível para quase todas as atividades, desde as mais simples, como afazeres cotidianos, às mais complexas. As redes de telecomunicação fazem parte de um grande contingente de tecnologias que ultrapassaram o limiar entre o consumo consciente e o consumo exacerbado de energia, provocando danos ao meio ambiente, muitas vezes, irreparáveis. Elas são divididas em: rede de núcleo, rede metropolitana e rede de acesso. A rede de acesso compreende grande parte da internet e, devido ao grande número de usuários finais (nós da rede), é também a rede com o maior consumo energético. É estimado que a rede de acesso chega a consumir 70% (setenta por cento) da energia de toda a rede de telecomunicação e continuará representando grande porção do consumo energético da internet na próxima década [3]. Estudos também mostram que a rede de acesso produz cerca de 1% (um por cento) de toda a poluição global de gás carbônico, tal poluição é equiparável a gerada pelo o transporte aéreo mundial [2].

Na rede de acesso, a tecnologia em destaque em países desenvolvidos, e que vem ganhando espaço em países subdesenvolvidos, é a tecnologia baseada em fibra ótica. Esta tem uma maior capacidade de transmissão de informação, ou largura de banda (largura de banda é uma medida da capacidade de uma fibra ótica transmitir dados). Além disso, a fibra ótica transmite dados em velocidade muito alta e com baixa perda na potência do sinal transmitido, deste modo, a transmissão de informação pode ser realizada com distâncias muito maiores, devido a sua baixa atenuação. Em termos de rede de acesso por fibra, a topologia ponto a multiponto, na forma de rede ótica passiva (*passive optical network*, PON), é a que possui a melhor relação custo benefício, tanto para o cliente como para as operadoras [11].

A rede PON consiste basicamente de uma fibra ótica principal, chamada de fibra tronco (*trunk fiber*), contendo um lado conectado ao terminal de linha ótica (*optical line terminal*, OLT) e outro alimentando um *splitter* (aparato passivo para dividir igualmente a potência). A

partir do *splitter*, a fibra tronco é dividida em fibras que se dispõem a cada assinante, onde é conectada a unidade de rede ótica (*optical network unit*, ONU). Esta distribuição apresenta uma topologia em árvore, onde a OLT é a raiz e as ONUs são as folhas da árvore [7]. Uma única fibra é utilizada em ambas direções de transmissão, downstream e upstream, embora tenha especificação para separação dos comprimentos de onda de cada direção. Todo esse conjunto de equipamentos a partir da OLT até a ONU denomina-se rede de distribuição ótica (*Optical Distribution Network*, ODN) [7].

Embora na fibra ótica a largura de banda possa ser considerada um recurso inesgotável, o crescimento do tráfego da internet é exponencial e, com isso, tornou-se evidente que a utilização da fibra tem que ser feita de forma mais eficiente, ou a faixa operacional do espectro ótico seria excedido, isto é, deve-se aproveitar ao máximo sua capacidade de transmissão [5]. Atualmente, as arquiteturas mais utilizadas para a PON são a *Gigabit-capable PON* (G-PON), e a *10 Gigabit-capable PON* (XG-PON), porém, novas arquiteturas foram estudadas para garantir um melhor desempenho e assegurar o uso eficiente da fibra ótica. A que apresentou melhor aceitação no ramo industrial é a *Time and Wavelength Division Multiplexing PON* (TWDM-PON), devendo ser implantada em breve.

Conforme mencionado acima, precisa-se utilizar a rede de acesso de forma que o consumo de energia seja menor. Visando este resultado, na arquitetura XG-PON, foi elaborado um mecanismo de gerenciamento de consumo de potência das ONUs, objetivando fazer com que as ONUs entrem em modos de operação de baixo consumo de energia, denominados: *Deep Sleep*, *Doze* e *Cyclic Sleep*, que serão explicados mais adiante neste trabalho. Contudo, o consumo de potência da OLT permanece o mesmo. O presente trabalho de graduação discorre a respeito deste problema e pretende apresentar um método de utilização eficiente da OLT na próxima arquitetura de PON, a TWDM-PON, para assim garantir uma economia energética dos provedores de serviço, que podem, portanto, diminuir o preço oferecido pelo serviço de internet de banda larga.

1.2 Definição do Problema e Objetivos

A questão do consumo energético mundial tornou-se tema de debate em diversos âmbitos profissionais. Assim como em outras áreas, é estudada com destaque na rede de acesso. Nesta, a utilização da fibra ótica ganhou bastante espaço na forma de PON. Na arquitetura

XG-PON, o consumo energético foi substancialmente diminuído da ONU com os modos de operação de baixa potência. Porém, o consumo energético dos OLTs, provedores de serviços, permanece o mesmo. Com uma economia energética, os provedores de serviços podem abaixar a tarifa paga pelo serviço de internet banda larga.

Este trabalho propõe um mecanismo de economia de potência do OLT na rede ótica de acesso de próxima geração, TWDM-PON (esta arquitetura será explicada mais adiante no trabalho), sendo analisada em forma de simulação utilizando o software MaTLab. Tal mecanismo consiste em agrupar as ONUs de uma rede no menor número de par de comprimentos de onda possível e assim, poder desligar os demais. Com isso, pretende-se economizar ao máximo os blocos de transmissão e recepção do OLT. Todavia, o mecanismo sofre penalização com o tempo de uma ONU efetivar uma migração entre dois pares de comprimentos de ondas, esse impacto influencia o acordo de nível de serviço (*Service Level Agreement*), ou SLA.

1.3 Resultados Alcançados

O presente trabalho apresenta resultados referente ao mecanismo de agrupamento das ONUs a partir da realização de migrações na TWDM-PON. Com o modelo de perfil de tráfego baseado em diferentes horas do dia da cidade de Davis-Califórnia [3], foi encontrada uma economia energética dos blocos de transmissão e recepção do OLT acima de 50% (cinquenta por cento), a um custo no acordo de nível de serviço abaixo de 0,3%, este impacto no serviço é devido as possíveis interrupções dos tráfegos das ONUs durante as realizações das migrações.

1.4 Organização do Trabalho Escrito

O trabalho de graduação está disposto da seguinte forma: O capítulo 2, Revisão Bibliográfica, consiste em fazer uma breve introdução sobre rede de acesso, aprofundando nas redes que utilizam fibra ótica como guia de onda, G-PON e XG-PON; detalha os modos de operação de baixa potência, *Deep Sleep*, *Cyclic Sleep* e *Doze*, assim como, descreve as arquiteturas propostas para a nova geração de rede ótica passiva. O capítulo 3, Desenvolvimento, explica como foi elaborado o simulador em MaTLab, como também, a realização do cálculo do SLA da rede. No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados simulados. Por fim, no capítulo 5, Conclusão e Trabalhos Futuros, tem-se a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

O capítulo corrente tem como função apresentar uma revisão bibliográfica dos fundamentos teóricos utilizados neste trabalho de graduação. Começamos descrevendo as redes de telecomunicações, dando ênfase na rede de acesso. Em seguida, foi utilizada a referência [7] para detalhar a rede ótica passiva, destacando as arquiteturas G-PON e XG-PON. Em relação à eficiência energética em PONs, as aplicações dos modos de operação de baixo consumo de potência, como *Deep Sleep Mode*, *Cyclic Sleep Mode* e *Doze Mode* a referência [10] foi utilizada. Posteriormente, são apresentadas as arquiteturas de PONs que foram discutidas a serem implantadas como a nova geração de rede ótica passiva. Iniciamos com arquitetura WDM-PON vista em [1], depois com a arquitetura OFDM-PON vista em [5][4]. Por fim, para arquitetura TWDM-PON foi utilizada a referência [9]. Finalmente, foi estudada a eficiência energética na rede TWDM-PON, explorando as referências [11][12].

2.2 Rede de Acesso

As redes de telecomunicações são divididas, de acordo com a proximidade ao usuário final, em: rede de núcleo, rede metropolitana e rede de acesso.

A rede mais distante, a rede de núcleo, é predominantemente utilizada a fibra ótica como guia de onda, por apresentar grande capacidade de largura de banda, baixa atenuação e alta velocidade de propagação. Por conter grande capacidade de transmissão, seus enlaces contam com multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM). Geralmente, a topologia em anel é usada para garantir segurança da rede.

A rede metropolitana é a rede intermediária, responsável pelo agrupamento e multiplexação

dos dados entre a rede de núcleo e a rede de acesso. Assim como na rede de núcleo, por apresentar grande volume de dados, é empregada a fibra ótica como guia de onda, e a multiplexação por comprimento de onda em seus enlaces.

Por fim, a rede mais próxima do usuário final e, que se encontra em maior quantidade, é a rede de acesso. Devido a isso, o custo é compartilhado por um número pequeno de usuários, e assim difere muito quanto a sua topologia e tecnologia. Apesar da tecnologia cabeada mais utilizada ser a Linha de Assinantes Digital (*Digital subscriber line*, DSL) [8], por causa do surgimento de uma ampla variedade de aplicações que necessitam de grande largura de banda e alta velocidade de transmissão, as tecnologias baseadas em fibra ótica estão sendo difundidas no segmento de acesso. Essas tecnologias diferem uma das outras em quão perto a fibra ótica chega ao usuário final, nomeada de FTTx (*Fiber to the x*), onde o x determina o local terminante da fibra. A exemplo de tecnologias baseadas por fibras temos: FTTH, em que a fibra chega até a casa do usuário final, FTTN, em que a fibra alcança uma vizinhança próxima, e a FTTB, em que a fibra chega à base de um prédio. Em relação a arquitetura, a tecnologia FTTx pode ser encontrada como ponto a ponto ou ponto a multiponto [8].

2.3 PON - Rede Ótica Passiva

Por economizar fibra ótica em relação a arquitetura ponto a ponto, a ponto a multiponto, na forma de rede ótica passiva (*Passiva Optical Network*, PON), foi a que apresentou o melhor custo benefício. A PON é composta por um Terminal de Linha Ótica (*Optical Line Terminal*, OLT), um conjunto de divisor de sinal ótico (*optical splitter*), uma coleção de Unidades de Redes Óticas (*Optical Network Units*, ONUs), e pela fibra que interconecta esses dispositivos. A topologia da PON é em árvores, onde a OLT é a raiz, que geralmente é localizada no escritório do provedor de serviço, e as ONUs são as folhas, localizadas no usuário final ou próximo a ele. Os conjuntos de fibras e splitter são nomeados de Rede de Distribuição Ótica (*Optical Distribution Network*, ODN) [7]. A figura 2.1 ilustra uma PON.

A PON utiliza o mecanismo de multiplexação por divisão de comprimento de onda, WDM, para sobrepor os sinais downstream e upstream em uma única fibra. No sentido downstream, o OLT envia o sinal a todas as ONUs a partir do divisor ótico de potência. Portanto, para garantir que apenas a ONU desejada compreenda a informação, o sinal é encriptografado, e as demais

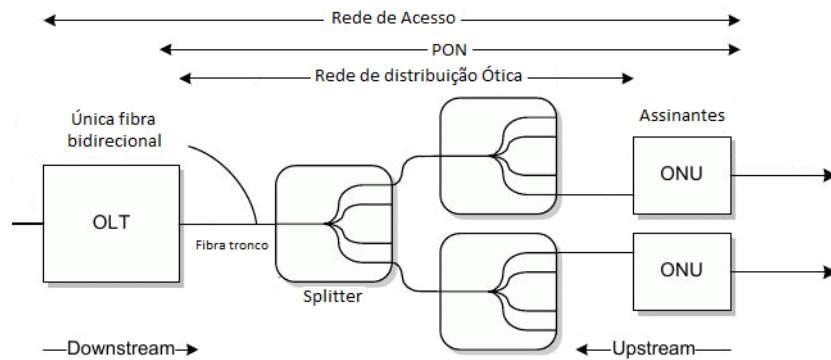


Figura 2.1 Arquitetura da rede PON, imagem retirada em [7]

descartam-no. No sentido upstream, as ONUs transmitem os sinais em rajadas durante intervalos de tempo (*slots*) alocados pelo OLT. Esses sinais são combinados utilizando um protocolo de acesso múltiplo, no qual, geralmente é usado o Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (*Time Division Multiple Access*, TDMA). Para que os dados upstream das ONUs cheguem corretamente, o período de transmissão de cada ONU é calculado pelo OLT, de acordo com o atraso de viagem do sinal dessa ONU. O atraso de viagem de uma ONU é calculado quando ela é ativada na rede. A ativação da ONU é realizada durante um intervalo de tempo separado pelo OLT, denominado de janela calma (*quiet window*) [7].

As próximas subseções apresentam dois exemplos de PONs, mostrando primeiramente a *Gigabit-capable PON* (G-PON) descrita na ITU-T G.984, seguindo da *10 Gigabit-capable PON* (XG-PON) descrita na ITU-T G.987.

2.3.1 G-PON

A rede G-PON é o padrão de rede ótica passiva adotado na América do Sul, Estados Unidos e Europa. Suas normas foram primeiramente definidas no órgão mundial de padronização de telecomunicações (*International Telegraph Union Telecommunication Standardization Sector*, ITU-T) em 2003 na série G.984 [7]. Sua taxa de downstream e upstream compartilhada entre todas as ONUs, é de 2,488 Gb/s e de 1,244 Gb/s, respectivamente. Seu alcance diferencial, distância entre a ONU mais próxima do OLT da ONU mais distante, é de 10, 20 ou 40km. Portanto, na figura 2.2, o alcance diferencial da PON é 30 km, porém o alcance diferencial entre as ONUs A, B e C, é aproximadamente 0 km.

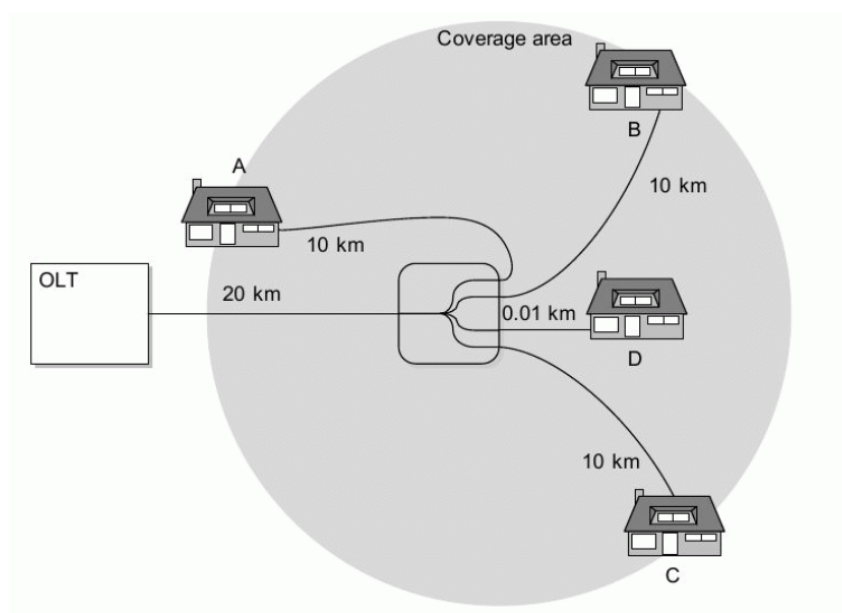


Figura 2.2 Alcance diferencial de uma rede GPON, imagem retirada em [7]

2.3.2 XG-PON

A segunda geração de rede PON, denominada de Próxima Geração de Rede Ótica Passiva (*Next Generation Passive Optical Network*, NG-PON), foi proposta com propósito de aumentar a quantidade de usuários e as taxas de transmissões da G-PON, contudo, coexistindo sobre a mesma rede de distribuição ótica, ODN. A arquitetura de maior destaque na NG-PON foi a XG-PON, o X vem do algarismo romano significando 10, pois essa arquitetura possibilita taxa de downstream e upstream compartilhada entre todas as ONUs de 9,953 GB/s e de 2,488 Gb/s, respectivamente. Teve sua padronização pela ITU-T na série de recomendação G.987, estabelecendo alcance diferencial de 20 ou 40 km e separando 10 bits para identificação da ONUs. Ou seja, na teoria, a rede pode suportar até 1023 ONUs, pois um endereço é reservado para o OLT.

2.4 Eficiência Energética em PONs

Como já mencionado, a eficiência energética tem ganhado destaque no desenvolvimento de projetos de redes de acesso, cuja tecnologia baseada em fibra ótica, na forma de PON, está em

crescente utilização. Devido a isso, muitos pesquisadores engajaram-se na busca por sistemas que permitam o desligamento de componentes das ONUs durante os períodos que elas estão inativas. Porém, para obter este resultado, é necessário um acordo entre o OLT e as ONUs, aumentando, por consequência, o grau de complexidade da rede. Por exemplo, a ONU deve ligar-se periodicamente para coletar o possível sinal enviado do OLT com o comando de ativação.

Estes esquemas foram padronizados primeiramente na arquitetura XG-PON, na forma de modos de operação de baixa potência. Estes são chamados de: *Deep Sleep*, *Cyclic Sleep* e *Doze*, que serão apresentados a seguir [10].

2.4.1 Deep Sleep Mode

No estado *deep sleep*, na ausência de tráfego, o transmissor e o receptor da ONU são desligados, provocando assim, a desativação de todas as funções da ONU. A ativação da ONU em *deep sleep* é lenta, por isso, é recomendável utiliza-lo apenas em situações de grande período de inutilização do usuário. Enquanto a ONU estiver trabalhando neste modo de operação, o OLT pode enviar quadros downstream, porém eles não serão processados pela ONU.

2.4.2 Cyclic Sleep Mode

O *cyclic sleep*, do mesmo modo que o *deep sleep*, os blocos de transmissão e recepção da ONU são desligados nos períodos de inutilização do usuário. Todavia, a ONU ativa estes blocos periodicamente sem a necessidade de qualquer incentivo da OLT. Durante esse processo, caso a ONU receba da OLT o comando de ativação, ela passa a ficar ativada até que seja possível entrar neste modo de operação novamente.

2.4.3 Doze Mode

O modo *doze*, diferentemente dos demais, desliga apenas o bloco de transmissão da ONU, permanecendo ativo o bloco de recepção. Desta forma, a recuperação da ONU para seu estado ativo pode ocorrer por estímulos locais, ou por comando do OLT, sendo um processo imediato, já que o receptor continua operante. Este modo de operação é indicado para aplicações que

necessitam somente de tráfego *downstream*.

O consumo energético destes modos de operação de baixa potência é apresentado na tabela 2.1, com as informações retiradas em [10].

Tabela 2.1 Consumo energético nos modos de operações da ONU

	Funcionamento Padrão	<i>Deep Sleep</i>	<i>Cyclic Sleep</i>	<i>Doze</i>
Transmissor	ON	OFF	ON-OFF	ON-OFF
Receptor	ON	OFF	ON-OFF	ON
Consumo (W)	3,85	< 0,7	0,8 - 1,0	1,7

2.5 NG-PON2

Devido a crescente quantidade de aplicações que necessitam de grande largura de banda e de alta velocidade, atualmente, padronizações estão sendo realizadas para as futuras PON, nomeadas de Próxima Geração de Rede Ótica de Acesso Estado 2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*, NG-PON2). Os principais requisitos para NG-PON2 são: suportar taxa agregada de todas as ONUs de 40 Gb/s, da suporte a internet de aparelhos móveis (*mobile backhaul*), oferecer serviço de 1 Gb/s ou mais para os usuários, 40 km de alcance, 64 unidades de ONUs e 40 km de alcance diferencial [9].

O Grupo de Serviço Completo de Rede de Acesso (*The Full Service Access Network Group*, FSAN) considerou muitas arquiteturas de redes para atender os requisitos da NG-PON2. Entre elas, foram estudadas: a Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda PON (*Wavelength Division Multiplexing PON*, WDM-PON), a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal PON (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON*, OFDM-PON), e a Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda e Tempo PON (*Time and Wavelength Division Multiplexed PON*, TWDM-PON). Essas arquiteturas serão apresentadas a seguir.

2.5.1 WDM-PON

As tradicionais PONs trabalham com um único par de comprimentos de onda sobre a fibra ótica, no qual o comprimento é compartilhado entre todos os assinantes da rede. Consequentemente, o número de ONUs fica limitado, devido as atenuações do sinal da própria fibra e ao

passar pelo *splitter*, cujo tem uma atenuação de aproximadamente 3 decibéis por cada divisão de duas fibras. A WDM-PON proporciona escalabilidade, pois fornece suporte a múltiplos pares de comprimentos de ondas sobre a mesma fibra, e sem a necessidade de perda potência do *splitter* [1].

A principal estratégia da WDM-PON é propor que cada ONU trabalhe com seu próprio comprimento de onda à taxa máxima, fazendo-se necessária a criação de canais ponto a ponto entre o OLT e as ONU, diferentemente das redes PON comuns, que utilizam a topologia ponto a multiponto. Outra característica da tecnologia WDM-PON, é que diferentes pares de comprimentos de ondas são capazes de trabalhar com diferentes taxa de dados [1].

Na transmissão de direção *downstream*, os canais são roteados entre o OLT e as ONUs por um dispositivo ótico passivo denominado de: *Arrayed Waveguide Grating*, AWG. E na transmissão de direção *upstream*, um demultiplexador WDM é utilizado no OLT para separar as transmissões de cada ONU. A figura 2.3 apresenta a arquitetura da WDM-PON [1].

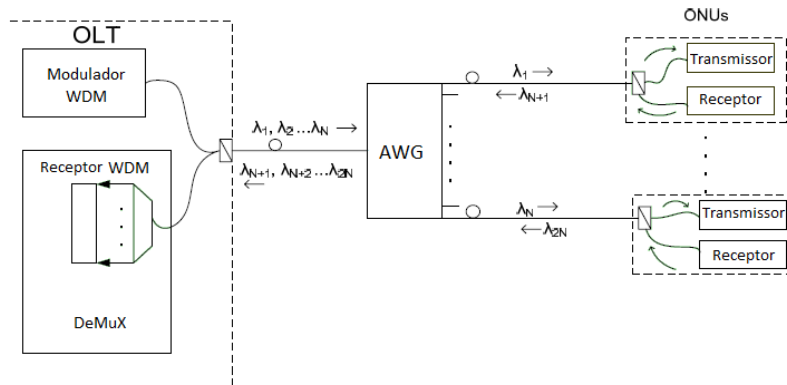


Figura 2.3 Arquitetura básica dos componentes da rede WDM-PON, imagem retirada em [1]

2.5.2 OFDM-PON

A segunda proposta de arquitetura para a NG-PON2 a ser apresentada é a OFDM-PON. Para entendê-la, primeiramente é necessário explicar a OFDM. Muitas aplicações já utilizam esta modulação, tais como: televisão em alta definição, redes *wireless* e transmissão em fibra multimodo. Sua principal característica é a transmissão em alta velocidade em largura de banda restrita.

A OFDM trabalha com a abordagem de “dividir para conquistar”, particionando o espectro de frequência em multiportadoras ortogonais. O objetivo deste procedimento é transformar sua resposta impulso não linear, em canais de menor largura de banda, que sobrepõem parcialmente suas subportadoras, sem gerar interferência, para que assim, sua resposta impulso possa ser considerada linear. A figura 2.4 representa a ideia chave desse procedimento [4].

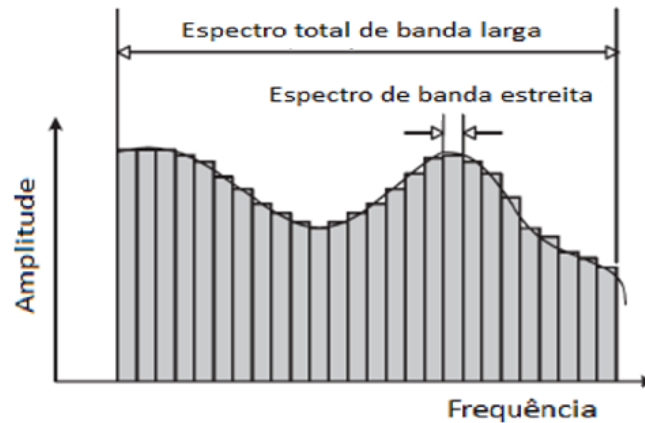


Figura 2.4 Divisão do espectro total de frequência em vários intervalos menores, de forma que a resposta destes intervalos se comportem de maneira linear, técnica dividir para conquistar

A sobreposição das subportadoras, sem gerar interferência, é garantida pelo princípio da ortogonalidade. Assim, para um sistema com N subportadoras, suas frequências, f_n , devem ser seleccionadas de modo que obedeça a equação:

$$f_n = \frac{n}{T}, n = 1, 2, \dots, N, \quad (2.1)$$

onde T significa o tempo do símbolo de cada subportadora OFDM [4].

Um resultado direto dessa aplicação é as subportadoras poderem trabalhar com diferentes modulações, como por exemplo, Modulação em Amplitude e Quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM), elevando sua eficiência espectral, apesar de diminuir o desempenho. Observando o enorme aproveitamento da tecnologia OFDM no domínio rádio frequência (RF), foi proposta a utilização do OFDM no domínio ótico na NG-PON2, com o nome de OFDM-PON. Para garantir este uso, o sinal deve ser primeiramente gerado eletronicamente e depois convertido para o domínio ótico com a utilização de lasers. Nesse cenário, cada subportadora é alocada a cada usuário, além disso, estas, dependendo da necessidade de transmissão das ONUs, podem ser partilhadas no tempo. Para assegurar o acesso multi usuário, é utilizado o

protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão de Frequências Ortogonais (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*, OFDM-A) [5].

2.5.3 TWDM-PON

Dentre todas as propostas de arquiteturas apresentadas, a TWDM-PON foi selecionada pela FSAN em Abril de 2012 como primeira solução para NG-PON2 [9]. Esta tecnologia utiliza WDM para empilhar múltiplos pares de comprimentos de ondas XG-PONs. Como mencionado, a XG-PON oferece taxa 9,953 Gb/s e 2,488 Gb/s para as transmissões *downstream* e *upstream*, respectivamente. Logo, para alcançar os requisitos de taxa de transmissão da NG-PON2, é necessário o sistema TWDM-PON com no mínimo 4 XG-PONs.

A arquitetura básica da TWDM-PON é mostrada na figura 2.5. Nela, são utilizados 4 pares de comprimentos de ondas ($\{\lambda_1, \lambda_5\}$, $\{\lambda_2, \lambda_6\}$, $\{\lambda_3, \lambda_7\}$, $\{\lambda_4, \lambda_8\}$), em que cada um deles representa uma XG-PON.

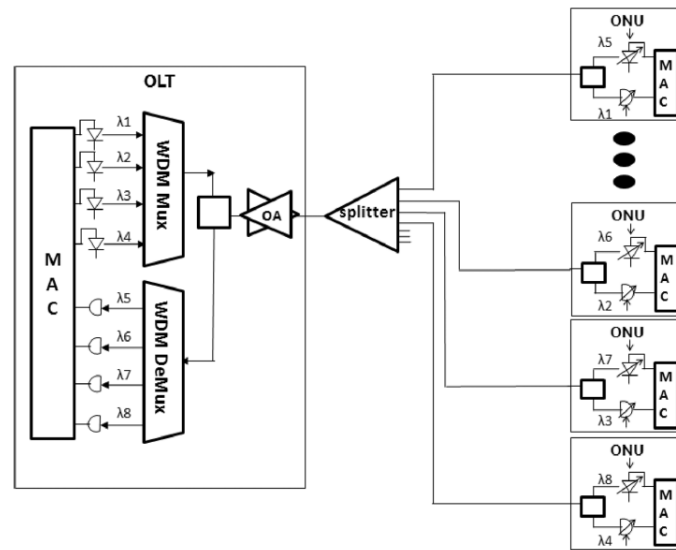


Figura 2.5 Arquitetura básica dos componentes da rede TWDM-PON, imagem retirada em [9]

Para o funcionamento desta arquitetura, as ONUs são equipadas com receptores e transmissores sintonizáveis. Por apresentar esta característica, a ONU pode trabalhar em qualquer par de comprimentos de onda da TWDM-PON. Com o objetivo de aumentar o alcance das redes XG-PONs, são adicionados amplificadores ópticos (*optical amplifiers*, OAs) no OLT. Apesar de

utilização deste equipamento, a ODN permanece passiva entre os OAs e ONUs, vide figura 2.5.

Uma individualidade da TWDM-PON é que ela pode melhorar sua capacidade, adicionando novos pares de comprimentos de onda, a medida que é necessário mais largura de banda [9].

Dentre todas estas arquiteturas apresentadas, a tecnologia TWDM-PON foi selecionada pela FSAN para NG-PON2 e descrita na ITU-T G.989, por ser considerada entre as operadoras a de menor risco e de menor custo, pois são necessárias poucas mudanças das atuais redes PONs.

As arquiteturas WDM-PON e OFDM-PON foram mencionadas, pois poderão ser utilizadas em futuros projetos.

2.6 Eficiência Energética em TWDM-PON

Recentemente, foi incluído um novo modo de operação de baixo consumo de potência, denominado de *Watchful Sleep* nas recomendações da ITU-T série G.989 (TWDM-PON). O autor pouco sabe desse modo de operação, contudo acredita-se que é um modo unificado entre os modos *Doze* e *Cyclic Sleep* presentes na XG-PON.

CAPÍTULO 3

Desenvolvimento

3.1 Introdução

Evidentemente, as operadoras devem oferecer o serviço de internet a qualquer instante, todavia, os usuários não a utilizam durante todo o dia. Usuários residenciais, por exemplo, frequentemente recorrem a internet durante o período da noite, deixando a ONU inativa durante o resto do tempo. Enquanto que em empresas, a internet é usada, quase sempre, em horários comerciais. Nas fases inativas, as ONUs iniciam seus modos de operação de baixa potência, porém, mesmo estando desligada, o OLT continua ativo, desperdiçando, portanto, energia. [12].

Este projeto tem o interesse em reduzir o consumo energético do OLT na tecnologia TWDM-PON, que trabalha com receptores e transmissores sintonizáveis, permitindo assim, que as ONUs possam se estabelecer em qualquer par de comprimentos de onda. Na referência [12], foi proposto um mecanismo de migração das ONUs, para que o OLT trabalhe com o menor número possível de pares de comprimentos de ondas, dado pela fórmula:

$$W = \left\lceil \frac{N}{C} \right\rceil \quad (3.1)$$

onde W é o número de pares de comprimentos de ondas ativos, N é o número de ONUs online, e C é o número máximo de ONUs por par de comprimentos de onda, e assim, a fim de economizar energia, desliga-se os demais que não estão sendo utilizados.

A TWDM-PON utiliza múltiplos pares de comprimentos de onda que suportam um conjunto de ONUs. Quando existem dois pares de comprimentos de ondas trabalhando abaixo do limite da quantidade de ONUs possível, pode-se agrupar todas as ONUs em apenas um par de comprimentos de onda, com o procedimento de migração, e desligar o outro.

Durante a conexão, o OLT monitora todas as ONUs conectadas, assim como seus pares de comprimentos de ondas. Se houver pelo menos uma possibilidade de migração das ONUs de

um par de comprimentos de onda para outro, o OLT envia o comando, um por um, a todas as ONUs com a informação de qual comprimento de onda elas devem se registrar. Ao receber o comando, a ONU executa a migração em 2 etapas: Primeiramente, anula seu atual comprimento de onda; em seguida, sintoniza o receptor e transmissor ao novo comprimento de onda. Após a realização do processo de migração, a ONU envia a confirmação do procedimento ao OLT, que quando obtém as confirmações de todas as ONUs, desliga o par de comprimentos de onda. A figura 3.1 mostra o processo de migração [12].

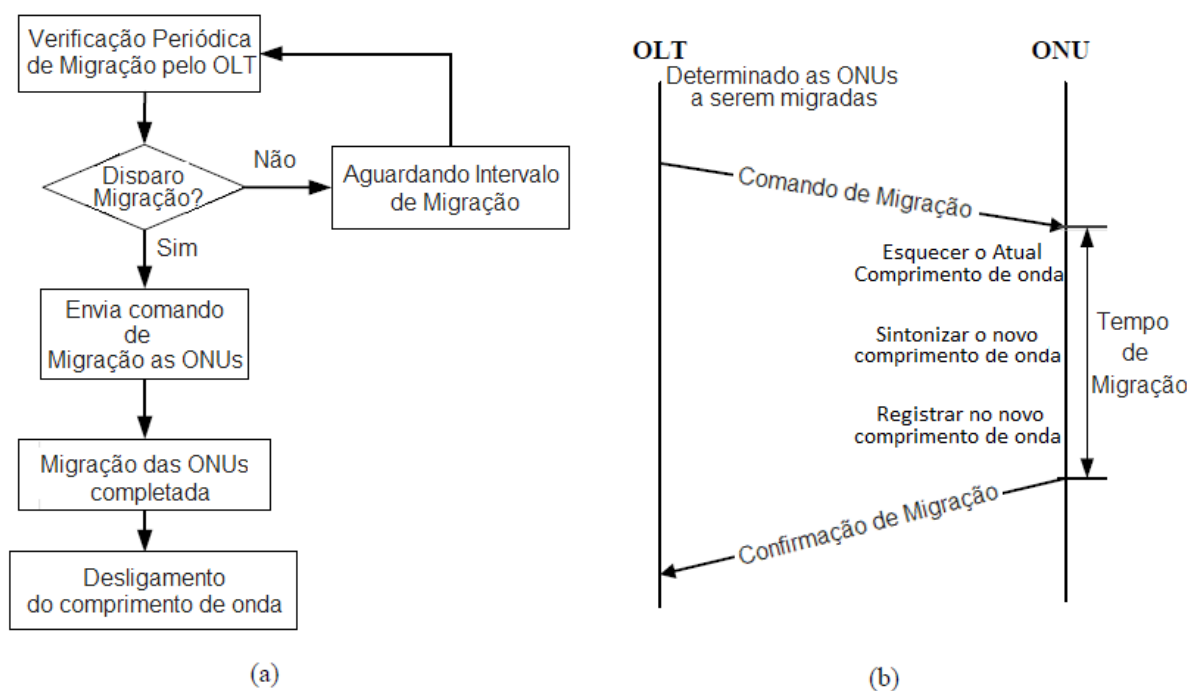


Figura 3.1 (a) procedimento de migração da ONU, (b) gerenciamento de migração da OLT, imagem retirada em [12]

3.2 Metodologia

Neste projeto, foi realizado um simulador TWDM-PON, no software MatLab. Como entrada, pede-se o número de pares de comprimentos de ondas do OLT e a quantidade de ONUs que estes conseguem suportar, calculando, desta forma, o número total de usuários da rede. Também é solicitado, o tempo médio de uma migração (tempo da OLT enviar ordem de migração para ONU, mais o tempo da ONU desligar seu atual e ativar seu novo par de comprimentos

de onda e mais o tempo da ONU enviar ao OLT que a realização de migração foi bem sucedida).

Foi necessário, para simulação, definir um modelo de tráfego da internet durante diferentes horas do dia, determinado pela a característica de utilização dos usuários. Em [3], foi desenvolvido o perfil de tráfego dos usuários da cidade de Davis-Califórnia. O dia, 24 horas, foi dividido em oito períodos de mesmo intervalos: período 1 — (00–03 h); período 2 — (03–06 h); período 3 — (06–09 h); período 4 — (09–12 h); período 5 — (12–15 h); período 6 — (15–18 h); período 7 — (18–21 h); e período 8 — (21–24 h). A porcentagem de ONUs desligadas durante esses intervalos é mostrado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Porcentagem de ONUs desligadas durante diferentes horas do dia

Período	1	2	3	4	5	6	7	8
(%)	42	43	49	50	51	33	25	40

3.3 Impacto na Rede

Apesar da vantagem de economizar energia do OLT ao desligar um par de comprimentos de onda, o processo de migração realizado pela ONU, possivelmente, pode interromper seu tráfego em andamento. Essa seção, é dedicada a calcular os efeitos negativos sobre o Acordo de Nível de Serviço da ONU (SLA), o qual é definido pela fórmula:

$$SLA = 1 - T_m \times S / (24 \times 3600) \quad (3.2)$$

onde T_m é o tempo médio de migração em segundos e S é a quantidade média de migração de cada ONU no intervalo de um dia [12]. Para saber a porcentagem, basta multiplicar o valor SLA encontrado por 100.

3.4 Simulação

A simulação realizada no MatLab se baseia no período de 1 dia. É atribuída, a todo segundo, uma probabilidade aleatória de ativação a cada ONU; se esta for maior que a probabilidade referente ao horário encontrado na tabela 3.1, é determinado que a ONU está ativa, se for menor,

é determinado que a ONU está desligada. No simulador, quando a ONU é caracterizada como ativada, recebe um par de comprimentos de onda, se este for diferente do antigo, é designado a ela uma migração. Durante a simulação, é computada a quantidade de ONUs ativas e a quantidade de pares de comprimentos de ondas que estão sendo utilizados. Com isso, é calculada a porcentagem da eficiência energética nos blocos de transmissão e recepção do OLT, dada pela fórmula:

$$E = 1 - N_{on}/N_{total} \quad (3.3)$$

onde E é a eficiência, N_{on} é a quantidade de pares de comprimentos de ondas ativos, e N_{total} é a quantidade total de pares de comprimentos de ondas. Para saber em porcentagem, basta multiplicar o valor encontrado de E por 100.

Após completar a simulação, cada ONU contém a informação de quantas migrações foram realizadas. De acordo com essa informação, é calculado o SLA da TWDM-PON, assim como a média e o desvio padrão da quantidade de migrações das ONUs.

CAPÍTULO 4

Resultados

4.1 Introdução

Esta seção é dedicada a mostrar e analisar os resultados encontrados das simulações. Primeiramente, para apresentar o simulador, foi proposta a configuração TWDM-PON mostrada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Configuração da TWDM-PON para primeira simulação

Quantidade de	Quantidade de	Tempo de
Pares de Comprimentos de Ondas	ONUs por Par de Comprimentos de Onda	migração (s)
8	8	0,01

Após entender o funcionamento do simulador, uma análise comparativa entre 3 tempos de migrações distintos foi realizada. As configurações são apresentadas na tabela 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.2 Configuração da TWDM-PON com 4 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,1 segundos

Quantidade de	Quantidade de	Tempo de
Pares de Comprimentos de Ondas	ONUs por Par de Comprimentos de Onda	migração (s)
4	2	0,10
4	4	0,10
4	8	0,10
4	16	0,10
4	32	0,10
4	64	0,10

A fim de compreender o comportamento que número de pares de comprimentos de ondas causam na TWDM-PON, simulações com as configurações de redes semelhantes as da tabelas

Tabela 4.3 Configuração da TWDM-PON com 4 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,05 segundos

Quantidade de Pares de Comprimentos de Ondas	Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda	Tempo de migração (s)
4	2	0,05
4	4	0,05
4	8	0,05
4	16	0,05
4	32	0,05
4	64	0,05

Tabela 4.4 Configuração da TWDM-PON com 4 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,01 segundos

Quantidade de Pares de Comprimentos de Ondas	Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de onda	Tempo de migração (s)
4	2	0,01
4	4	0,01
4	8	0,01
4	16	0,01
4	32	0,01
4	64	0,01

4.2, 4.3 e 4.4 foram realizadas, porém com o número de pares de comprimentos de ondas diferentes, conforme apresentado nas tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

4.2 Primeira Simulação

Com a configuração TWDM-PON apresentada na tabela 4.1, foi encontrado: SLA de 99,70%; a quantidade média de migração de 25.861; e eficiência energética de aproximadamente 51,56%, conforme mostrado na figura 4.1. Isto quer dizer que as operadoras de serviços podem economizar em aproximadamente 50% (cinquenta por cento) a potência nos blocos de transmissão e recepção dos OLTs, a um custo de SLA menor que 0,3%.

As quantidades de ONUs e pares de comprimentos de ondas ativos separados por períodos de uma hora são mostrados na figura 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.5 Configuração da TWDM-PON com 8 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,1 segundos

Quantidade de Pares de Comprimentos de Ondas	Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda	Tempo de migração (s)
8	2	0,10
8	4	0,10
8	8	0,10
8	16	0,10
8	32	0,10
8	64	0,10

Tabela 4.6 Configuração da TWDM-PON com 8 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,05 segundos

Quantidade de Pares de Comprimentos de Ondas	Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda	Tempo de migração (s)
8	2	0,05
8	4	0,05
8	8	0,05
8	16	0,05
8	32	0,05
8	64	0,05

De acordo com a figura 4.2, tem-se que entre 13 às 14 horas, foi o período com maior número de ONUs ativas, com a 38 unidades. A menor quantidade de ONUs ativas foram durante os períodos entre 18 às 19 horas e 21 às 22 horas, com 17 unidades.

De acordo com a figura 4.3, os períodos entre 8 às 9 horas, 10 às 11 horas, 12 às 15 horas e 21 às 22, foram encontrados o maior número de pares de comprimentos de ondas ativos, no total de 5. Os períodos das 2 às 3 horas, 7 às 8, 16 às 21 e 22 às 24 foram encontrados o menor número de pares de comprimentos de ondas ativos, no total de 3.

O SLA e o desvio padrão de todas as 64 ONU é apresentado na figura 4.4. É compreendido que a quantidade de ONUs não interfere no valor final do SLA da rede, pois as ONUs apresentaram valores de SLAs bem próximos.

Tabela 4.7 Configuração da TWDM-PON com 8 pares de comprimentos de ondas e tempo de migração de 0,01 segundos

Quantidade de Pares de Comprimentos de Ondas	Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda	Tempo de migração (s)
8	2	0,01
8	4	0,01
8	8	0,01
8	16	0,01
8	32	0,01
8	64	0,01

Number of Wavelength Pairs: 8

Number of ONUs on one Wavelength Pairs: 8

Migration Delay (s): 0.01

Start

Results

Service Level Agreement (%): 99.7007

Average Amount Migration: 25861

Efficiency (%): 51.5625

Figura 4.1 Configuração e Resultados da primeira simulação

4.3 SLA com diferentes Tempos de Migrações

Verifica-se conforme os gráfico apresentado nas figuras 4.5 e 4.6, que quanto menor o tempo de migração maior é o SLA, isto é devido a pouca necessidade de interrupção dos tráfegos das ONUs. Uma característica notável é que a função SLA versus Quantidade de ONUs por par de

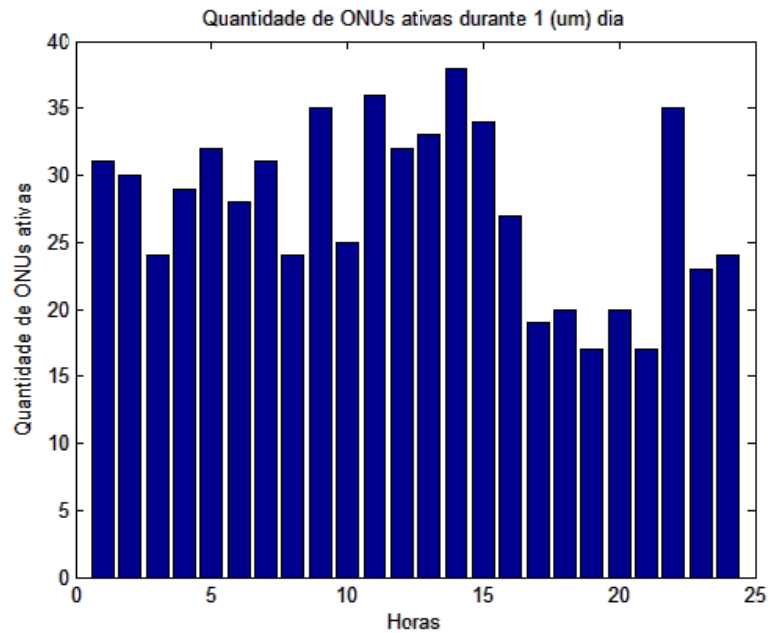


Figura 4.2 Quantidade de ONUs ativas durante um dia de simulação

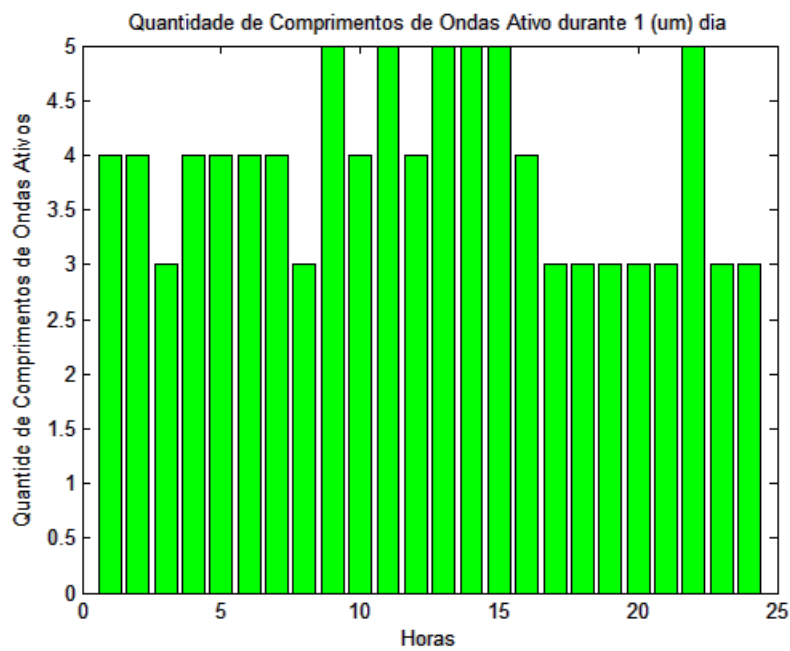


Figura 4.3 Quantidade de pares de comprimentos de ondas ativos durante um dia de simulação

comprimento de onda se comporta conforme uma função logarítmica, desse modo, um estudo prévio da instalação da TWDM-PON deve ser realizado a fim de garantir o seu melhor desempenho.

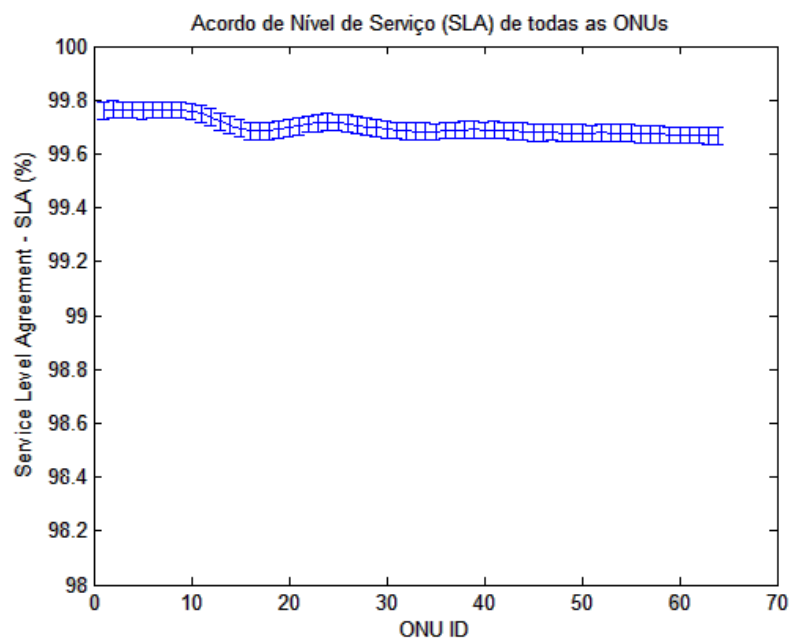


Figura 4.4 SLA das 64 ONUs

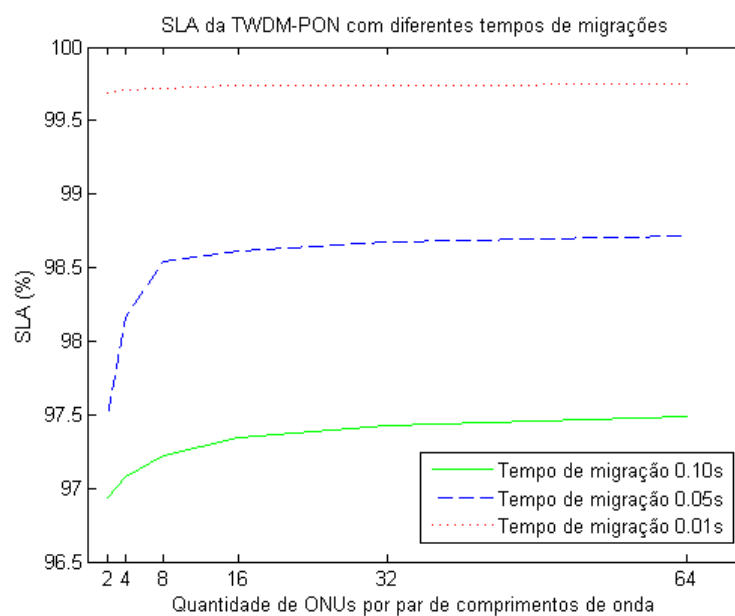


Figura 4.5 Função do SLA versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 4 pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações

A diferença dentre os gráficos mostrados nas figuras 4.5 e 4.6, é que o crescimento inicial

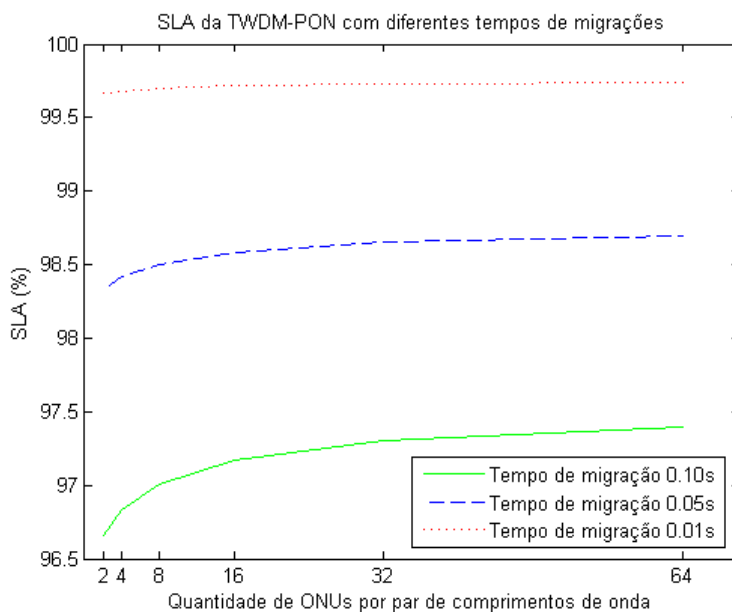


Figura 4.6 Função do SLA versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 8 pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações

do SLA é maior no caso de Menor Quantidade de Pares de Comprimentos de Ondas.

4.4 Eficiência Energética com diferentes Tempos de Migrações

É apresentando nas figura 4.7 e 4.8, o gráfico da eficiência energética dos blocos de transmissão e recepção dos OLTs em simulações com configurações de 4 e 8 pares de comprimentos de ondas com tempos de migrações de 0,1, 0,05 e 0,01.

A única conclusão que podemos inferir dos gráficos mostrados nas figuras 4.7 e 4.8, é que a eficiência energética não depende do tempo de migração, pois a ativação de uma ONU no cenário de rede estudado é um evento probabilístico, conforme apresentado no capítulo Desenvolvimento.

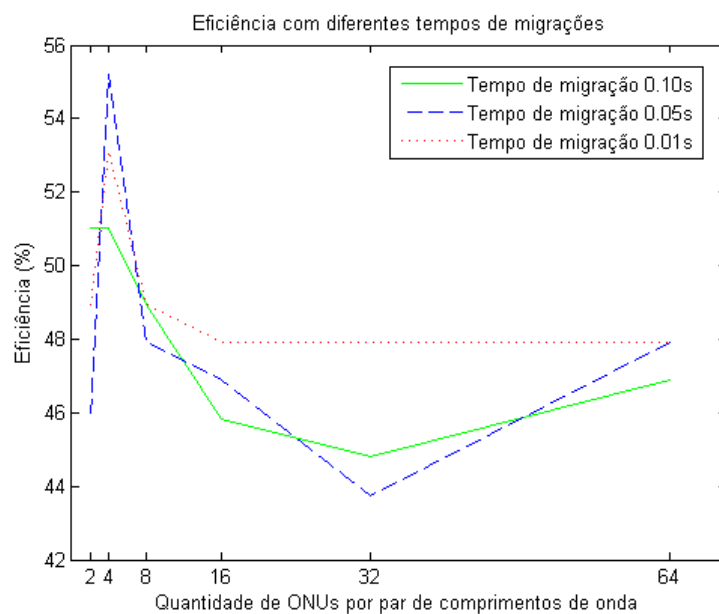


Figura 4.7 Função da Eficiência versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 4 Pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações

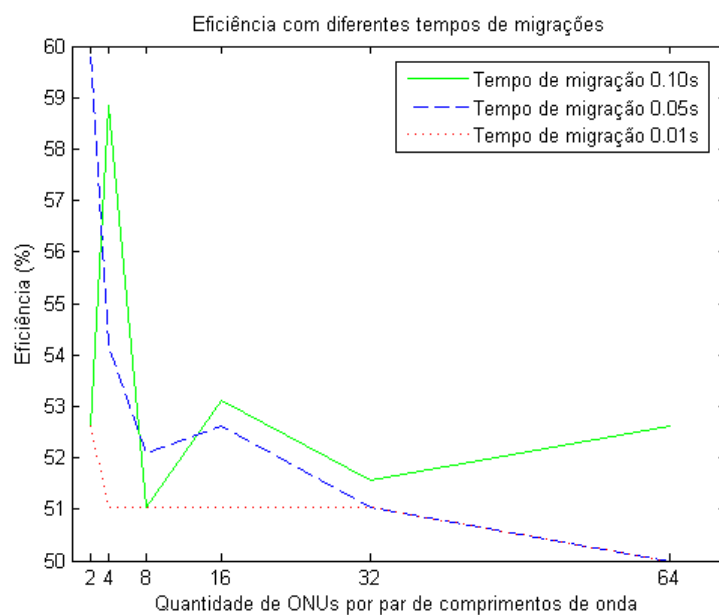


Figura 4.8 Função da Eficiência versus Quantidade de ONUs por Par de Comprimentos de Onda, com 8 Pares de Comprimentos de Ondas e diferentes Tempos de Migrações

Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho de graduação, foi proposta a realização do mecanismo de migrações das ONUs na TWDM-PON descrito em [12] no perfil de tráfego da cidade de Davis-Califórnia calculado em [3]. Através da realização de migração da ONU, o OLT pode desligar os pares de comprimentos de ondas que não estão sendo utilizados, e com isso minimizar seu consumo energético nos blocos de transmissão e recepção. Durante a realização da migração, a conexão da ONU pode ser interrompida, o que ocasiona um impacto negativo no SLA.

Foi desenvolvido um simulador no software MatLab, o qual permitiu calcular a economia energética e o impacto no SLA gerado pelas migrações. Foram realizadas simulações com diferentes configurações TWDM-PON, sendo elas: com 4 e 8 pares de comprimentos de ondas; cada par trabalhando com 2, 4, 8, 16, 32 e 64 ONUs; e com o tempo para realizar uma migração de 10, 50 e 100 milissegundos.

Nos resultados das simulações, encontramos que a função SLA em função do número de ONUs por par de comprimentos de ondas se comportar como uma função logarítmica, sendo assim, para garantir um melhor resultado, é importante um estudo prévio na elaboração da TWDM-PON. Também conseguimos alcançar eficiências energéticas de aproximadamente 50% (cinquenta por cento), a um custo de apenas 0,3% no SLA.

Como trabalho futuro, pretende-se utilizar um software de simulação de rede, como o OM-NeT++, a fim de estudar a eficiência energética dos modos de operação de baixa potência na ONU (*Deep Sleep*, *Cyclic Sleep* e *Doze*) em conjunto com o mecanismo de migração na TWDM-PON com diferentes cenários de perfil de tráfego de usuário.

APÊNDICE A

Lista de Acrônimos

AWG - *Arrayed Waveguide Grating*

DSL - *Digital subscriber line*

FSAN - *Full Service Access Network*

FTTB - *Fiber To The Building*

FTTH - *Fiber To The Home*

FTTN - *Fiber To The Node*

G-PON - *Gigabit-capable Passive Optical Networks*

ITU-T - *ITU Telecommunication Standardization Sector*

NG-PON - *Next-Generation Passive Optical Network*

NG-PON2 - *Next-Generation Passive Optical Network 2*

OA - *Optical Amplifier*

ODN - *Optical Distribution Network*

OFDM-PON - *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Passive Optical Network*

OFMDA - *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*

OLT - *Optical Line Terminal*

ONU - *Optical Network Unit*

PON - *Passive Optical Network*

QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*

RF - *Radio Frequency*

SLA - *Service-Level Agreement*

TDMA - *Time Division Multiple Access*

TWDM-PON - *Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network*

XG-PON - *10-Gigabit-Capable Passive Optical Network*

WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*

WDM-PON - *Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network*

Referências Bibliográficas

- [1] A. Banerjee. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (wdm-pon) technologies for broadband access: a review. *JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING*, 2005.
- [2] U. Barth. *GreenTouch Roadmap: Strategic Research Areas and Project Portfolio*. 2012, 2014.
- [3] P. Chowdhury. Building a green wireless-optical broadband access network (woban). *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2010.
- [4] N. Cvijetic. 100 gb/s optical access based on optical orthogonal frequency-division multiplexing. *IEEE Communications Magazine*, 2010.
- [5] N. Cvijetic. Ofdm for next-generation optical access networks. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2012.
- [6] J. Farber. Measurement and modelling of internet traffic at access networks. *Proceedings of the EUNICE*, 1998.
- [7] D. Hood. *Gigabit-Capable Passive Optical Networks*. Wiley, 2012.
- [8] C. Lam. *Passive Optical Networks - Principles and Practice*. Academic Press, 2007.
- [9] Y. Luo. Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (twdm-pon) for next-generation pon stage 2 (ng-pon2). *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, 2013.
- [10] B. Skubic. Evaluation of onu power saving modes for gigabit-capable passive optical networks. *IEEE Network*, 2011.
- [11] E. Wong. Characterization of energy-efficient and colorless onus for future twdm-pons. *OPTICS EXPRESS*, 2013.

- [12] H. Yang. User migration in time and wavelength division multiplexed pon (twdm-pon). *Optics Express*, pages 651–666, 2013.