

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CRISTIAN DANIEL JOHANN

**NOVA TOPOLOGIA DE REDE ÓPTICA PASSIVA PARA A INTERFACE COM AS
REDES WIRELESS 5G**

**Alegrete
2019**

CRISTIAN DANIEL JOHANN

**NOVA TOPOLOGIA DE REDE ÓPTICA PASSIVA PARA A INTERFACE COM AS
REDES WIRELESS 5G**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, Área de Concentração em Comunicações Ópticas, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.**

Orientador: Prof. Dr. Djeisson Hoffmann Thomas

**Alegrete
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

J65 Johann, Cristian Daniel

Nova topologia de rede óptica passiva para a interface com as redes wireless 5G / Cristian Daniel Johann. - 2019.

66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade

Federal do Pampa, ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES, 2019.
"Orientação: Djeisson Hoffmann Thomas".

1. Redes de acesso 2. Redes ópticas passivas. 3. Redes sem-fio 5G. 4. NG-PON2. 5. TWDM-PON I. Título.

CRISTIAN DANIEL JOHANN

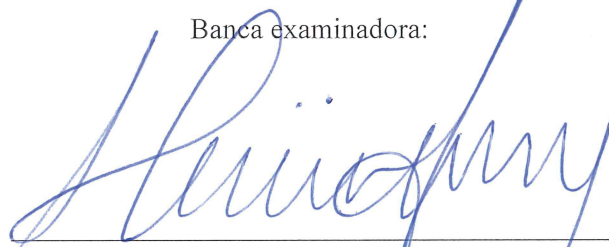
NOVA TOPOLOGIA DE REDE ÓPTICA PASSIVA PARA A INTERFACE COM AS REDES WIRELESS
5G

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

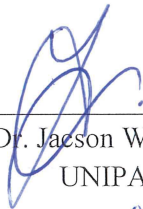
Área de Concentração: Radiofrequência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de Junho de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Djeisson Hoffmann Thomas
Orientador



Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes
UNIPAMPA



Prof. Dr. Marcos Vinício Thomas Heckler
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família,
especialmente aos meus pais, Dionísio e
Vanice, meus maiores exemplos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus familiares, em especial aos meus pais Dionísio e Vanice, por todo incentivo e incondicional apoio, jamais medindo esforços.

Aos meus irmãos, Éderson e Luander, os quais sempre estiveram presentes e jamais mediram esforços para me auxiliar, sempre que necessitei.

Agradeço também à minha namorada, Nathaly, a qual estive ao meu lado em todos os momentos e me deu força sempre que precisei. Obrigado pelas palavras de apoio e carinho nos momentos de tensão e por, junto comigo, suportar a saudade gerada pela distância.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Professor Dr. Djeisson Hoffmann Thomas, pelos ensinamentos passados ao longo deste trabalho, assim como pelo auxílio na execução e construção do mesmo. Pelas inúmeras reuniões, trocas de e-mails e suporte sempre que precisei.

Agradeço a todos os meus professores que, no decorrer da caminhada, não mediram esforços para transmitir o conhecimento da melhor forma possível.

Também agradeço a oportunidade de conhecer e construir inúmeras amizades em Alegrete, as quais levarei para toda a vida. Em especial aos amigos Jonatas e Rômulo, pelos momentos de descontração e churrascos realizados.

Meu muito obrigado a todos que, de alguma forma, independente da distância, sempre me apoiaram durante o período de graduação.

*“Julgue seu sucesso pelas coisas que você
teve que renunciar para consegui-lo”.*

(Dalai Lama)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova topologia de rede óptica passiva (PON) com capacidade para atender a demanda agregada de tráfego de dados das futuras redes *wireless* 5G (sem fio). O emprego da rede de acesso óptica permite reduzir a banda passante necessária ao atendimento da demanda agregada dos usuários *wireless* 3G, 4G e 5G, quando comparada ao formato de multiplexação digital empregado nas redes de acesso *wireless*, através do compartilhamento de um ou mais canais de uma rede PON, sem prejuízo ao tráfego normal de dados dos usuários da rede óptica passiva. A topologia proposta opera na banda O (na janela de transmissão de 1310 nm) e emprega lasers de modulação direta (DML), transmissão NRZ (sem retorno ao zero ou *Non-Return to Zero*), e detecção coerente, sem empregar amplificação óptica, características técnicas que a credenciam mesmo à expansão do tráfego agregado das redes *wireless* 5G, como o que é esperado em função do crescimento das aplicações IoT (internet das coisas ou *Internet of Things*), sem que isto signifique custo incremental por aumento de capacidade da rede óptica.

Palavras-Chave: redes de acesso, redes ópticas passivas, redes sem-fio 5G, NG-PON2, TWDM-PON.

ABSTRACT

This article introduces a new passive optical network topology (PON) which capacity is compatible to the aggregated data traffic demand of the future 5G wireless networks. The employment of the optical access network enables to reduce the bandwidth required to support the aggregated demand of 3G, 4G and 5G wireless users when compared to the digital multiplexing technique used by the wireless access networks, by sharing one or more channels of the PON network, with minimum impact over the normal data traffic regarding the PON users. The proposed topology operates in the O-band (1310 nm transmission window) and uses direct modulated lasers (DML), NRZ transmission (Non-Return to Zero) and coherent detection, without optical amplification, technical characteristics compatible even with the expansion of the aggregated traffic of the 5G wireless networks, e.g., to support the increase of the IoT (internet of things) applications, with no incremental cost which would be needed to improve the capacity of the optical network.

Keywords: access networks, passive optical networks, 5G wireless networks, NG-PON2, TWDM-PON.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura geral de uma rede PON	29
Figura 2 – Diagrama de blocos da topologia de rede PON proposta.....	32
Figura 3 – Espectro elétrico das duas subportadoras de RF, em 27,5 e 37,5 GHz, combinadas.....	36
Figura 4 – Espectro óptico após o combinador de potências B1 da Figura 2.....	37
Figura 5 – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra SSMF, ponto “c” da Figura 2	38
Figura 6 – Espectro óptico após o divisor passivo 1x3, ponto “d” da Figura 2	39
Figura 7 – Composição do bloco C1, responsável pela demodulação das subportadoras de RF.....	40
Figura 8 – Espectro elétrico após o APD centrado em 1250 nm da Figura 7	41
Figura 9 – Espectro elétrico após o primeiro divisor passivo 1x2 da Figura 7	42
Figura 10 – Espectro elétrico após o segundo divisor passivo 1x2 da Figura 7	43
Figura 11 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz da Figura 7	44
Figura 12 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz da Figura 7	44
Figura 13 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 27,5 GHz em 1250 nm.....	45
Figura 14 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1250 nm.....	46
Figura 15 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1270 nm.....	46
Figura 16 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1290 nm.....	47
Figura 17 – Diagrama de blocos da topologia de rede PON proposta: <i>uplink</i>	49
Figura 18 – Espectro elétrico das duas subportadoras de RF combinadas: <i>uplink</i> , ponto “a” da Figura 17.....	50
Figura 19 – Espectro óptico após o combinador de potências B1: <i>uplink</i> , ponto “b” da Figura 17	51
Figura 20 – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra SSMF: <i>uplink</i> , ponto “c” da Figura 17	52
Figura 21 – Espectro óptico após o divisor passivo 1x3: <i>uplink</i> , ponto “d” da Figura 17	52
Figura 22 – Espectro elétrico após o APD centrado em 1310 nm: <i>uplink</i>	53
Figura 23 – Espectro elétrico após o primeiro divisor passivo 1x2: <i>uplink</i>	54

Figura 24 – Espectro elétrico após o segundo divisor passivo 1x2: <i>uplink</i>	54
Figura 25 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda (27,5 GHz): <i>uplink</i>	55
Figura 26 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda (37,5 GHz): <i>uplink</i>	56
Figura 27 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 27,5 GHz em 1310 nm.....	57
Figura 28 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1310 nm.....	57
Figura 29 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1330 nm.....	58
Figura 30 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1350 nm.....	58

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Comparação entre o consumo da banda passante do canal óptico utilizando multiplexação digital e multiplexação analógica A-RoF..... 30
- Tabela 2** – Medição da BER_{MIN} e do Q_{MAX} referentes aos diagramas de olho capturados: *downlink*..... 47
- Tabela 3** – Medição da BER_{MIN} e do Q_{MAX} referentes aos diagramas de olho capturados: *uplink*..... 59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
2	BASE TEÓRICA E MOTIVAÇÃO	28
2.1	Rede PON.....	28
2.2	Multiplexação A-RoF.....	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Descrição da Topologia Proposta.....	31
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
4.1	Propagação no sentido de <i>downlink</i>	36
4.2	Propagação no sentido de <i>uplink</i>	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6	TRABALHO SUBMETIDO À PUBLICAÇÃO	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICES	64

1 INTRODUÇÃO

As provedoras de serviço de dados experimentaram um forte crescimento de demanda nos últimos anos em função do aumento do acesso aos dispositivos móveis e também do crescimento rápido da utilização de aplicações como o acesso às redes sociais, vídeos *on demand*, jogos *online* e realidade virtual, dentre outros. A expectativa do mercado de telecomunicações é que uma explosão de demanda ocorra com o advento da *Internet das Coisas* (IoT ou *Internet of Things*). Para dar suporte a esta demanda, está em desenvolvimento e teste, especialmente nos países do Oriente, Europa e América do Norte, uma nova geração do padrão de comunicação *wireless*, o 5G, cuja taxa de dados por cliente será próxima de 10 Gbps (gigabits por segundo) bi-direcional e, por conseguinte, o tráfego agregado por estação rádio-base (BS ou *Base Station*) poderá superar as centenas de Gbps.

O novo padrão de transmissão de dados *wireless*, o 5G, além do tráfego sob taxas de dados consideravelmente mais altas (da ordem de 10 Gbps), oferecerá qualidade, confiabilidade e segurança superiores e uma infinidade de novos serviços. No entanto, estas características precisam ser também suportadas nas redes de acesso, que trabalharão com o tráfego *wireless* agregado, sob pena de limitar o potencial do novo padrão 5G àquele dos padrões anteriores, 4G ou ainda 3G. Estabelece-se, portanto, um desafio tecnológico de integração entre as redes *wired* e *wireless* (com e sem fio), ou seja, é necessário garantir uma transição perfeitamente compatível entre os dados originados pelos usuários e o tráfego agregado destes nas redes de acesso, sem qualquer prejuízo à qualidade técnica da comunicação ou truncamento do potencial de serviços oferecidos.

Dentre os canais de transmissão atualmente disponíveis, o único com capacidade comprovada de atender o tráfego agregado com a qualidade, a confiabilidade e a segurança necessárias é a fibra óptica, cujos canais suportam atualmente taxas da ordem de 500 Gbps e estima-se que esta taxa alcance 1 Tbps (terabits por segundo) num futuro próximo, de acordo com o avanço corrente da tecnologia. Dentre as categorias de redes ópticas, aquela que atenderá o padrão 5G é a de *acesso*, conhecida também como *rede óptica passiva* (PON ou *Passive Optical Network*). Uma nova geração de rede PON, chamado *NG-PON2* ou *TWDM-PON* (*New Generation PON* ou *Time and Wavelength Division Multiplexing PON*) está sendo desenvolvida com este objetivo específico (RODRIGUES, C., 2018), mas

alguns desafios ainda restam, dentre os quais o desenvolvimento ou o aprimoramento de técnicas de modulação e multiplexação que permitam o compartilhamento eficiente do canal óptico entre os diversos usuários *wireless*, sem prejuízo ao tráfego normal de dados dos clientes da rede PON.

A multiplexação digital do tráfego wireless 3G e 4G, proveniente da interface CPRI (*Common Public Radio Interface* ou Interface Rádio Pública Comum), utilizada nas redes *wireless* atuais e em adaptação para o padrão 5G, resulta em um consumo excessivo de banda passante, indicando que mesmo a banda passante da fibra, a maior dentre os guias de onda disponíveis, não seria suficiente para transportar a demanda de dados agregada do padrão 5G (TAYQ, Z., 2017).

Nesse contexto, destacam-se algumas iniciativas de pesquisa, sendo elas:

- A-RoF (*Analog-Radio-over-fiber* ou rádio-sobre-fibra analógico): segundo (ZHANG, L., 2017) a modulação analógica de uma subportadora de RF sobre uma portadora óptica é uma técnica promissora para atender as altas taxas agregadas de dados do novo padrão *wireless* 5G;
- Integração fronthaul baseada em CPRI: em (KWON, Y. K., 2014), é tratada a integração da transmissão de sinais de rádio no padrão CPRI aos canais ópticos WDM através do aprimoramento da técnica de multiplexação no domínio do tempo (TDM ou *Time Division Multiplexing*), usualmente empregada nas redes PON para compartilhamento dos seus canais de comunicação *uplink* (do usuário para o núcleo da rede) e *downlink* (do núcleo da rede para o usuário) entre os seus diversos usuários;
- Convergência Fixa e Móvel com Modulação Empilhada: em (ZHANG, L., 2018) é apresentado um mecanismo de modulação para realizar a convergência de transmissão de banda larga fixa com as redes de acesso sem fio. Nesta análise, o sinal analógico das redes sem fio é multiplicado pelo sinal óptico digital que transporta serviços de banda larga fixa. No receptor recupera-se primeiramente o sinal analógico através do algoritmo de detecção de borda de imagem e posteriormente o sinal digital fazendo-se uso do algoritmo dos mínimos quadrados. Neste esquema, a convergência fixa e móvel pode ser realizada com um único comprimento de onda, reduzindo assim o custo da rede de acesso em termos do número de transceptores. Além disso, este modelo é compatível, também, com as

redes de acesso já existentes. As desvantagens são as penalidades de potência tanto para o sinal das redes sem fio quanto para o sinal da rede fixa em função do compartilhamento do canal e também do processamento de sinal necessário ao empilhamento dos formatos de modulação sobre um mesmo canal;

- Em (TAYQ, Z., 2017) um gerador de sinais cria uma sequência no padrão CPRI (sinal digital) e um divisor óptico permite replicar este sinal antes de transmiti-lo a partir de fibra óptica monomodo padrão (SSMF ou *Standard Single-Mode Optical Fiber*);

- Em (HARSTEAD, E., 2019) são apresentadas diretrizes técnicas que devem nortear o projeto das redes ópticas que darão suporte às futuras transmissões com elevadas taxas de dados, dentre as quais a operação em banda O (1310nm), utilização de transmissão simples NRZ (*Non-Return to Zero* ou sem retorno à zero), lasers com modulação direta (DML) na ONU, o emprego de taxas de transmissões assimétricas e topologias com baixo custo incremental em detrimento à utilização de amplificadores ópticos;

- Em (NOKIA, 2016) são descritas as redes fixas de banda larga sob o ponto de vista das operadoras de telefonia móvel enquanto necessárias à transmissão do tráfego agregado de dados;

- Compactação CPRI: segundo (RAMALHO, L., 2017), uma abordagem para melhorar a eficiência espectral é a compressão dos sinais CPRI. De fato, a compactação de dados tem sido objeto de estudo há algumas décadas e tem como alvo especialmente as aplicações de compactação de imagens, áudio e vídeo para aperfeiçoar o seu armazenamento e a sua transmissão em redes de telecomunicações;

- Em (SALEH A. H., 2016) é realizada uma revisão tecnológica para o próximo estágio da geração NG-PON2, destacando as importantes contribuições desta nova topologia de rede. É realizada também uma análise em vista dos inúmeros desafios que a NG-PON2 vêm enfrentando, como custo, alcance, capacidade e consumo de energia.

- Em (BEHRENS, C., 2018) é descrito como utilizar as infraestruturas de acesso fixo e móvel para responder de forma eficiente aos requisitos das futuras arquiteturas de transportes de dados.

Por conseguinte, propomos uma nova topologia de rede PON, baseada no padrão NG-PON2, e implementada com o emprego de uma técnica de multiplexação A-RoF, com o intuito de reduzir a banda passante necessária ao atendimento da demanda dos usuários *wireless* 3G, 4G e 5G, quando comparada ao formato de multiplexação digital empregado nas redes de acesso *wireless*. Esta nova topologia é implementada através do compartilhamento de um ou mais canais de uma rede PON, sem prejuízo à qualidade de comunicação dos usuários da rede óptica passiva.

A topologia proposta opera na banda O (na janela de transmissão de 1310 nm) e emprega lasers de modulação direta (DML), transmissão NRZ (*Non-Return to Zero* ou sem retorno ao zero), e detecção coerente, sem empregar amplificação óptica, características técnicas que a credenciam mesmo à expansão do tráfego agregado das redes *wireless* 5G, como o que é esperado em função do crescimento das aplicações IoT, sem que isto signifique custo incremental por aumento de capacidade da rede óptica.

Assim, a seção 2 apresenta a base teórica, com a descrição de uma rede PON geral e demonstração da motivação do estudo. A seção 3 apresenta a descrição da topologia proposta. Já na seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos em simulação e, na seção 5, são apresentadas as conclusões referentes à topologia proposta, indicando a sua viabilidade de implementação. Por fim, na seção 6, é apresentada uma submissão de publicação realizada na revista eletrônica IEEE Latin América com os resultados obtidos ao longo deste trabalho.

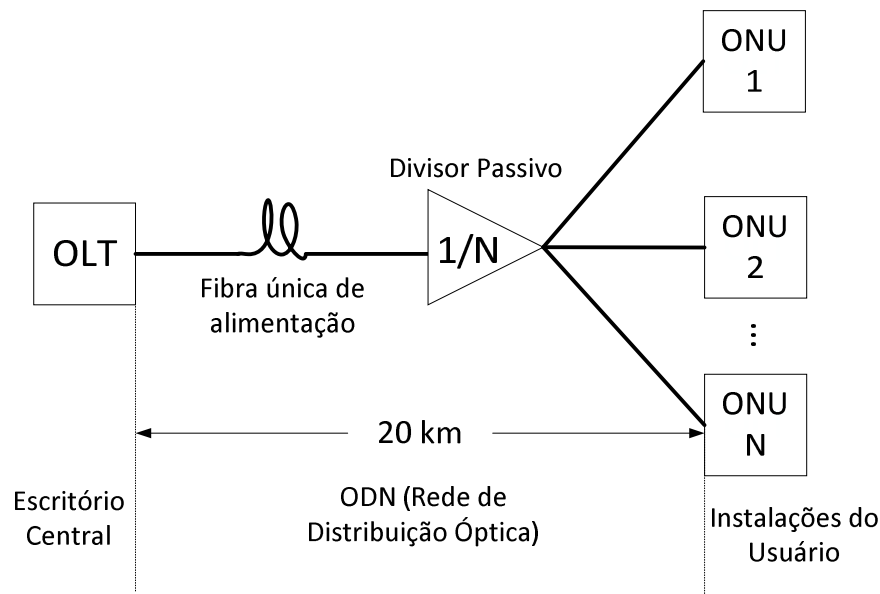
2 BASE TEÓRICA E MOTIVAÇÃO

2.1 Rede PON

Uma PON é baseada no uso de comprimentos de onda CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* ou multiplexação por divisão de comprimento de onda larga) e transmissão bidirecional em uma única fibra óptica (KEISER, G., 2014). Esta topologia de rede recebe este nome por não apresentar componentes ativos entre o escritório central (OLT, *Optical Line Terminal* ou terminal de linha óptica) e as instalações do usuário (ONT, *Optical Network Terminal* ou terminal de rede óptica). Conseqüentemente, apenas componentes ópticos passivos são inseridos no caminho de transmissão da rede (ODN, *Optical Distribution Network* ou rede de distribuição óptica) para encaminhar os sinais contidos em comprimentos de onda ópticos específicos que se propagam nos sentidos de *downlink* (da OLT para as ONTs), neste caso 1250nm destinado à subportadora de RF e os canais de 1270nm e 1290nm às portadoras ópticas. No sentido de *uplink* (das ONTs para a OLT), o canal de 1310nm destina-se à subportadora de RF enquanto os canais de 1330nm e 1350nm abrigam as portadora ópticas. Além disso, uma rede PON deve possuir distância máxima de 20 km entre OLT e ONTs.

A Figura 1 representa a arquitetura de uma típica rede PON. A OLT situa-se no escritório central da provedora do serviço de dados e é responsável por controlar o fluxo bidirecional (*downlink* e *uplink*) de informações através da rede. O divisor de potência passivo (1/N) fica localizado próximo à residência dos clientes, em um parque ou em algum outro ambiente próximo do usuário, e divide a potência óptica que recebe, sem qualquer seletividade, em N frações iguais a serem encaminhadas aos assinantes. No caso em que a ONT situa-se diretamente nas instalações do usuário ela é também chamada ONU (*Optical Network Unit* ou unidade de rede óptica) e a sua principal função é realizar a interface do usuário com a rede PON, seja no sentido de *downlink* ou *uplink*, sendo a sua operação comandada pela OLT (KEISER, G., 2014).

Figura 1 - Arquitetura geral de uma rede PON.



Fonte: Autor.

2.2 Multiplexação A-RoF

Com o intuito de demonstrar o melhor aproveitamento da banda passante disponível no canal óptico viabilizada pela topologia proposta, a Tabela 1 apresenta a relação entre a taxa de dados do canal de rádio ($BW=1$ GHz), em Gbps, necessária para realizar a multiplexação digital do sinal proveniente da interface CPRI, utilizada nas redes *wireless* atuais (ITU-T, 2018) e em adaptação para o padrão 5G, em comparação com a taxa de dados necessária para multiplexar os dados no domínio analógico fazendo-se uso da técnica A-RoF. Para tanto, destaca-se que, em conjunto com a multiplexação digital, foi utilizada uma modulação digital em amplitude do tipo OOK (*ON-OFF-Keying* ou chaveamento liga-desliga) e que ambas as análises são realizadas em função do número de antenas empregadas.

Conforme pode ser verificado fazendo-se uso de duas antenas, é necessária uma taxa de dados de 100 Gbps para multiplexação digital, ao passo que, fazendo-se uso da multiplexação analógica (por A-RoF), é necessária uma taxa de dados de apenas 1 Gbps. Para complementar a comparação entre as multiplexações realizadas nos domínios digital e analógico, a terceira seção da tabela apresenta a taxa de dados utilizada como valor percentual da banda passante do canal óptico (neste caso 500 Gbps/canal). Fazendo-se uso de duas antenas, para a multiplexação dos dados no domínio digital, verificou-se o consumo de 20% da

banda passante total do canal óptico, ao passo que o emprego da multiplexação analógica (A-Rof) requer um consumo de apenas 0,20 % da banda óptica disponível por canal.

Tabela 1 – Comparação entre o consumo da banda passante do canal óptico utilizando multiplexação digital e multiplexação analógica A-RoF

Nº de antenas	Banda-Passante Necessária [Gbps]		% Banda-Passante do Canal Óptico [BW=500 Gbps]	
	Digitalização Interface CPRI (BW=1 GHz)* [I]	Multiplexação por A-RoF [II]	[I]	[II]
2	100	1	20	0,20
8	400	4	80	0,80
64	3.200	32	640	6,40
256	12.800	128	2.560	25,60

Fonte: Autor. *Taxas de dados líquidas aproximadas (sem código de linha) calculadas de acordo com a norma técnica "ITU-T GSTR-TN5G".

Esta relação de 1%, ou economia de 99% da banda disponível no canal óptico, se mantém com o aumento proporcional no número de antenas. Por exemplo, para o emprego de sessenta e quatro antenas haverá um consumo de 640% da banda passante do canal óptico, sendo necessários, neste caso, pelo menos sete canais ópticos para abrigar a demanda de tráfego gerada. Utilizando a multiplexação por A-Rof, para o mesmo número de antenas, haverá um consumo de apenas 6,40% da banda passante de um canal óptico.

Desta forma, fica evidente a viabilidade de se empregar a técnica de multiplexação analógica A-RoF para o tráfego agregado da rede de acesso, uma vez que esta apresenta, teoricamente, um consumo da banda passante do canal óptico cem vezes menor em relação à banda passante consumida empregando a multiplexação digital dos dados, padrão das interfaces CPRI das redes *wireless*. Esta economia na utilização de banda passante do canal óptico será revertida no atendimento de um número significativamente maior de usuários das futuras redes 5G e também na maior disponibilidade de banda passante por usuário para suportar, dentre outros serviços, as diversas aplicações IoT, muitas delas imprevisíveis atualmente.

3 METODOLOGIA

A topologia de nova rede óptica passiva para a interface com as futuras redes *wireless* 5G foi desenvolvida e testada por meio de simulações realizadas no *software OptiSystem*, em sua versão aberta do ano de 2016, uma vez que a universidade não possui a licença do mesmo. Assim, alguns recursos do *software* encontravam-se desabilitados, reduzindo a gama de testes possíveis a serem realizados.

Mesmo se tratando de uma versão de teste, o *software* foi de suma importância na realização das análises e caracterização da topologia proposta, sendo possível avaliar a qualidade da comunicação através de medições dos diagramas de olho, BER e fator Q, medidas estas que, para serem realizadas na prática, demandariam uma infraestrutura laboratorial de alto custo.

Assim, a seção 3.1 apresenta a topologia proposta através da análise dos seus diversos blocos constituintes, conforme ilustrado na Figura 2.

3.1 Descrição da Topologia Proposta

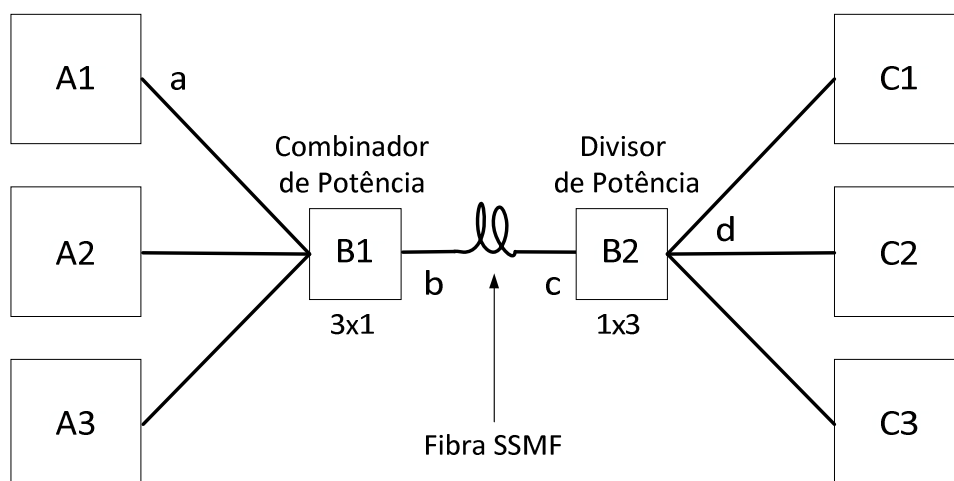
A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos da topologia proposta para o sentido de transmissão *downlink*. A mesma topologia é empregada no sentido de transmissão *uplink*, com a disposição invertida dos seus blocos constituintes, e, portanto, possui descrição equivalente. Ambos os sentidos de transmissão empregam a banda O (1310nm), janela de transmissão de menor dispersão da fibra óptica SSMF (KEISER, G., 2014), três canais no sentido de *downlink*, 1250nm, 1270nm e 1290nm, e três canais no sentido de *uplink*, 1310nm, 1330nm e 1350nm. Vale ressaltar que esta transmissão bidirecional ocorre simultaneamente em uma única fibra óptica SSMF.

O bloco A1 da Figura 2 representa a multiplexação analógica A-RoF. Nele ocorre a geração das subportadoras de RF, nas frequências de 27,5 GHz e 37,5 GHz, as quais, combinadas, são utilizadas para modular a portadora óptica no comprimento de onda de 1250nm. Estas subportadoras se destinam a transmitir o tráfego agregado de cada célula da rede *wireless* 5G e a separação de 10 GHz na frequência foi escolhida para minimizar a interferência cruzada ou *crosstalk* entre as subportadoras ao compartilharem a portadora óptica e o canal de transmissão. O sinal modulante de cada subportadora de RF é obtido pelo acoplamento do sinal

gerado por um gerador de sequência de bits pseudoaleatórios a um gerador de pulsos NRZ, convertendo a sequência de bits em pulsos elétricos. Este sinal resultante é acoplado à entrada de um modulador de amplitude elétrico, cuja portadora é gerada na frequência de interesse (27,5 GHz ou 37,5 GHz). A saída de cada um dos moduladores elétricos de amplitude é submetida a um combinador de potência, cujo espectro de saída pode ser visualizado na Figura 3. A saída deste combinador de potência é inserida como sinal modulante de um modulador eletro-óptico externo do tipo *Mach Zender* (MZ), cuja portadora óptica é emitida por um laser monomodo no comprimento de onda de 1250 nm.

Os blocos A2 e A3 representam a geração das portadoras ópticas em 1270nm e 1290nm, também a partir de lasers monomodo, as quais correspondem ao tráfego de dados dos usuários da rede óptica passiva. Para a modulação destas portadoras ópticas fez-se uso de modulação direta pelo emprego de lasers DML (*Directly Modulated Laser*), técnica mais simples e barata quando comparada aos moduladores MZ. Como sinal modulante, neste caso, foi utilizado simplesmente o sinal de saída do gerador de pulsos elétricos pseudoaleatórios NRZ, obtidos como anteriormente. Tendo sido geradas, as portadoras ópticas (1250nm, 1270nm e 1290nm) são acopladas no bloco B1 da Figura 2, o qual representa um combinador de sinais ópticos 3x1, cujo espectro óptico de saída é mostrado pela Figura 4.

Figura 2 – Diagrama de blocos da topologia de rede PON proposta.



Fonte: Autor.

Conforme visualizado na Figura 2, após combinadas as portadoras ópticas são transmitidas através de uma fibra óptica padrão que compõe a ODN, com

atenuação na banda O de 0,38 dB/km, ao longo da distância máxima permitida, 20 km. O espectro medido após a fibra é ilustrado na Figura 5.

Na saída da fibra, os sinais são submetidos ao bloco B2, o qual representa um divisor passivo de sinais ópticos 1x3. As três saídas deste divisor apresentam 3 frações com espectros idênticos à entrada, os quais são direcionados aos blocos de demodulação C1, C2 e C3 para que sejam recuperadas as informações transmitidas a partir dos blocos A1, A2 e A3, respectivamente. Em cada bloco (C1, C2 e C3), o primeiro componente consiste de um fotodetector APD (*Avalanche Photodiode* ou fotodiodo avalanche) centrado no comprimento de onda de interesse e responsável por realizar a demodulação da portadora óptica. No caso das portadoras ópticas correspondentes ao tráfego de dados dos usuários das redes passivas (1270nm e 1290nm), a recuperação da informação transmitida é alcançada já na saída do fotodetector APD (banda base).

Por sua vez, para a recuperação da informação transmitida pelas subportadoras de RF, utilizou-se a detecção coerente, a qual, além de aumentar a imunidade ao ruído e às interferências originadas na transmissão através do canal óptico, agregam flexibilidade ao formato de modulação e ao aumento da taxa de dados, características perfeitamente compatíveis com as aplicações futuras (IoT, por exemplo). Para implementar a detecção coerente, após o APD o sinal elétrico é separado em duas partes iguais por um divisor de potência elétrica, ou seja, com 50% da potência em cada terminal de saída do divisor. Enquanto o sinal do primeiro terminal é conectado diretamente a uma das entradas de um misturador elétrico (*mixer*), o sinal do segundo terminal é encaminhado a um filtro passa-banda centrado na frequência de interesse (27,5 GHz ou 37,5 GHz). A saída deste filtro é conectada à outra entrada do misturador elétrico que realiza o batimento entre os sinais. Na saída do misturador tem-se um sinal com frequência proporcional à diferença de frequências entre os sinais em batimento, o qual corresponde à informação de interesse.

A fim de estimar a potência de chegada no ponto “d” da Figura 2, foi realizado o cálculo do balanço de potência óptica da topologia proposta.

De acordo com os Apêndices A,B,C e D é possível verificar de que forma os blocos da Figura 2 foram simulados no software OptiSystem. Para realizar o cálculo do balanço de potência óptica é necessário considerar a potência gerada pelo laser,

como também todas as perdas (α) enfrentadas ao longo da transmissão do sinal óptico, desde o transmissor até o receptor:

Bloco A1:

- $P_{IN_A} = 7,7$ dBm;
- α_{MZ} (*Mach Zender*) = 8 dB.

Bloco A2:

- $P_{IN_B} = -1,7$ dBm.

Bloco A3:

- $P_{IN_C} = -1,8$ dBm.

Bloco B1:

- α_{3x1} (Combinador) = 2dB.

Fibra SSMF:

- $\alpha_{FIBRA} = 7,6$ dB.

Bloco B2:

- α_{1x3} (Divisor) = 4,77 dB.

Para a realização do cálculo de balanço de potência óptica, descontam-se todas as atenuações em relação à potência emitida pelo laser. Abaixo estão demonstrados os cálculos para os três comprimentos de onda de *downlink* (1250nm, 1270nm e 1290nm).

Cálculo do balanço de potência para o comprimento de onda de 1250nm:

$$P_{OUT} = P_{IN_A} - [\alpha_{MZ} + \alpha_{3x1} + \alpha_{FIBRA} + \alpha_{1x3}]$$

$$P_{OUT} = -14,67 \text{ dBm}$$

Cálculo do balanço de potência para o comprimento de onda de 1270nm:

$$P_{OUT} = P_{IN_B} - [\alpha_{3x1} + \alpha_{FIBRA} + \alpha_{1x3}]$$

$$P_{OUT} = -16,07 \text{ dBm}$$

Cálculo do balanço de potência para o comprimento de onda de 1290nm:

$$P_{OUT} = P_{IN_C} - [\alpha_{3x1} + \alpha_{FIBRA} + \alpha_{1x3}]$$

$$P_{OUT} = -16,17 \text{ dBm}$$

Para o sentido de *uplink*, os cálculos são análogos pois são utilizados os mesmos componentes ao longo do caminho de propagação dos sinais ópticos. Por conseguinte, os balanços de potência dos comprimentos de onda de 1250nm, 1270nm e 1290nm são equivalentes aos balanços de potencia dos comprimentos de onda de 1310nm, 1330nm e 1350nm, respectivamente. Os Apêndices C e D representam como o tráfego no sentido de *uplink* foi simulado no software OptiSystem.

Os valores de P_{OUT} (potência de saída) calculados para os comprimentos de onda de 1250, 1270e 1290nm representam a potência aferida na entrada do APD, centrados nas frequências de interesse, ilustrado no Apêndice B.

Para todos os casos apresentados, o cálculo do balanço de potência demonstra a viabilidade da topologia proposta em termos do nível de sinal necessário à transmissão da informação com qualidade e confiabilidade, dado que em todos os casos o nível de potência óptica recebida é maior do que o limiar de recepção do fotodetector APD, $P_r = -41,20 \text{ dBm}$.

A próxima seção demonstrará os resultados obtidos nas simulações realizadas no *software OptiSystem*, em sua versão 2016, considerando os dois sentidos de propagação.

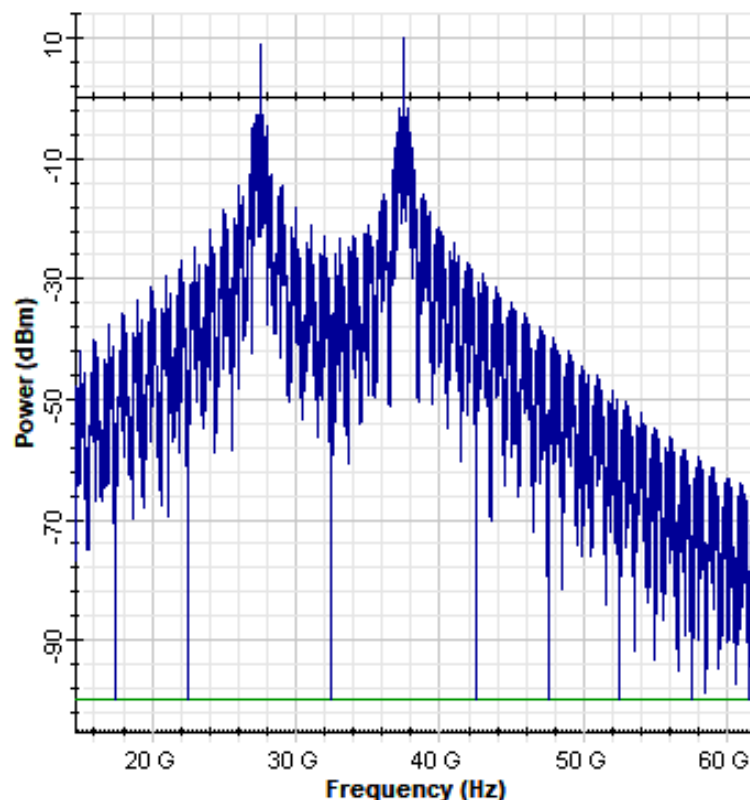
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados das simulações para ambos os sentidos de propagação. A seção 4.1 apresentará as aferições para o sentido de *downlink* enquanto a seção 4.2 apresentará as medições referentes ao sentido de *uplink*.

4.1 Propagação no sentido de *downlink*

A Figura 3 indica o espectro elétrico combinado das duas subportadoras de RF moduladas, nas frequências de 27,5 GHz e 37,5 GHz, respectivamente, o qual foi obtido no ponto “a” da Figura 2.

Figura 3 – Espectro elétrico das duas subportadoras de RF, em 27,5 e 37,5 GHz, combinadas.

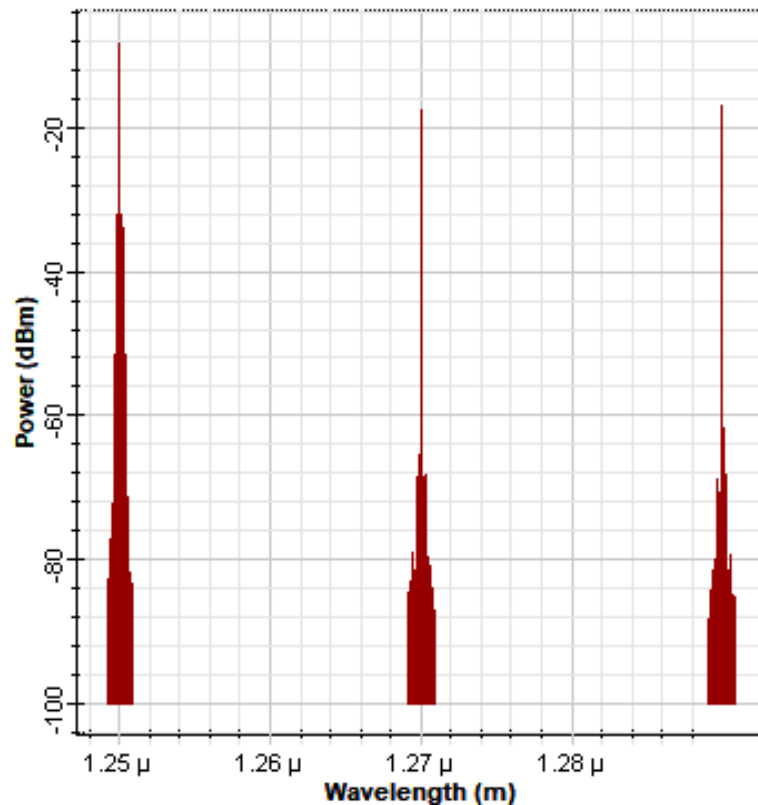


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Após geradas as portadoras ópticas nos blocos A1, A2 e A3, os sinais são encaminhados ao combinador de potências ópticas 3x1, cujo espectro de saída é apresentado na Figura 4, correspondente ao ponto “b” da Figura 2. Neste ponto, a potência das portadoras incorpora, portanto, a atenuação correspondente aos

dispositivos componentes dos blocos A, após os respectivos lasers, e também do combinador de potência óptica 3x1.

Figura 4 – Espectro óptico após o combinador de potências B1 da Figura 2.



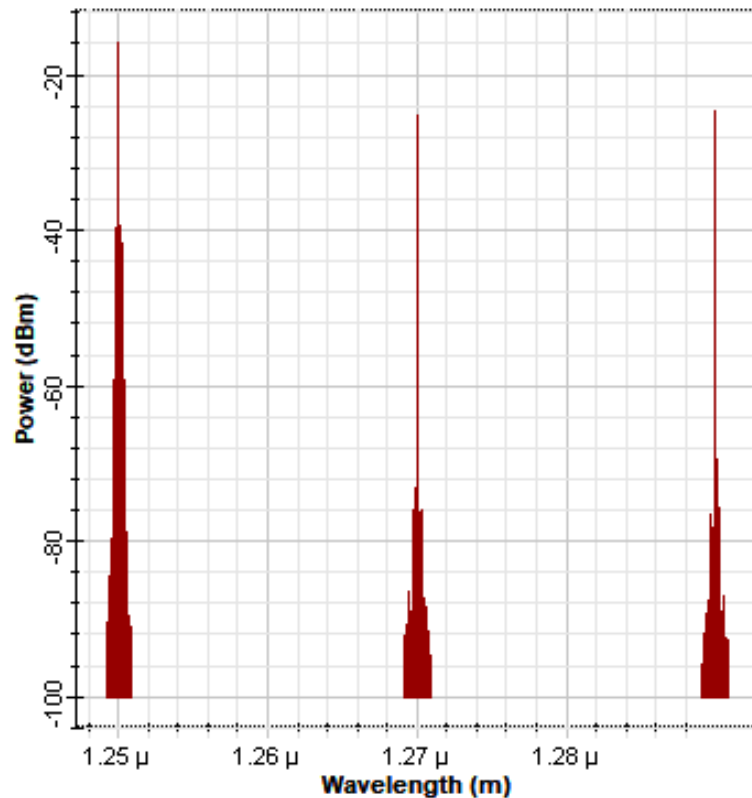
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Na Figura 4 é possível perceber uma diferença de intensidade entre as portadoras ópticas transmitidas. Isto se deve ao fato de que a potência do canal de 1250nm teve de ser ajustada para um nível mais alto, 7,7 dBm, para compensar a penalidade de potência por *crosstalk* entre as subportadoras de RF, originada pelo compartilhamento do canal e do meio de propagação óptico. Já as potências de saída dos lasers DML nos canais de 1270nm e 1290nm, responsáveis pela transmissão exclusiva dos dados de usuários da rede PON, foram ajustadas para -1,7 dBm e -1,8 dBm, respectivamente. Estes níveis de potência são considerados baixos em relação aos níveis usualmente empregados por canal das redes PON, 5 dBm, margem que, enquanto disponível, representa economia de energia na geração dos sinais ópticos necessários à comunicação.

As portadoras ópticas combinadas são então transmitidas por 20 km de fibra óptica SSMF, com atenuação de 0,38 dB/km na banda O. A Figura 5 apresenta o

espectro após a transmissão dos sinais pela fibra óptica, referente ao ponto “c” da Figura 2.

Figura 5 – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra SSMF, ponto “c” da Figura 2.

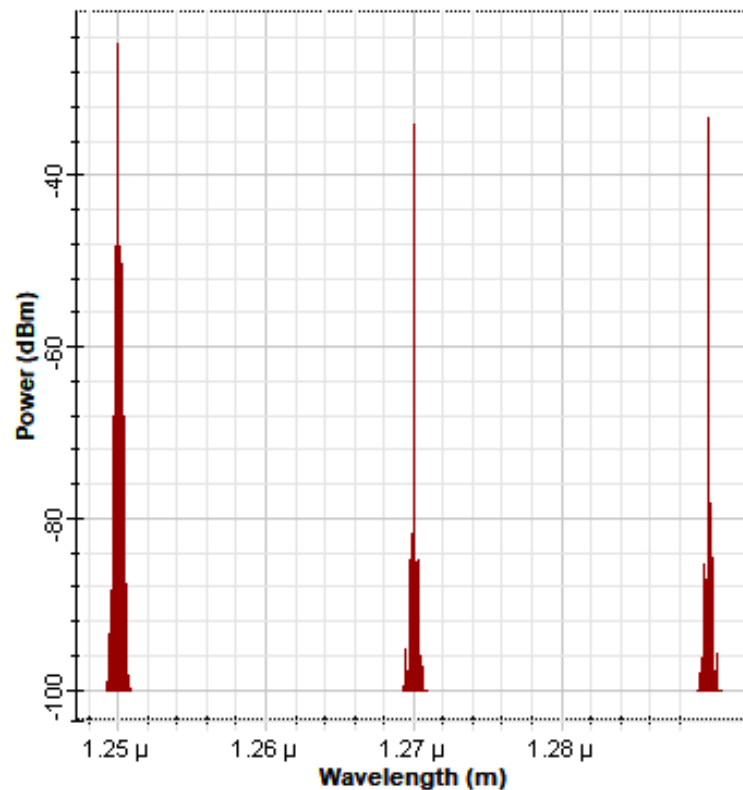


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

A atenuação total da fibra na banda O é $0,38 \text{ dB/km} * 20\text{km} = 7,60 \text{ dB}$, atenuação esta que pode ser comprovada ao compararmos os espectros das Figuras 4 e 5, em função das diferentes amplitudes dos sinais ópticos.

Após a propagação na fibra, os sinais são submetidos ao bloco B2, que representa um divisor óptico passivo 1x3. Convém lembrar que cada uma das saídas do divisor passivo apresenta o mesmo espectro. Além disto, e como o divisor utilizado possui uma perda de inserção de 4 dB, os sinais manterão a mesma forma daqueles da Figura 5, porém atenuados em 4 dB. A Figura 6 mostra o espectro do sinal de *downlink* após o divisor óptico passivo 1x3, correspondente ao ponto “d” da Figura 2.

Figura 6 – Espectro óptico após o divisor passivo 1x3, ponto “d” da Figura 2.



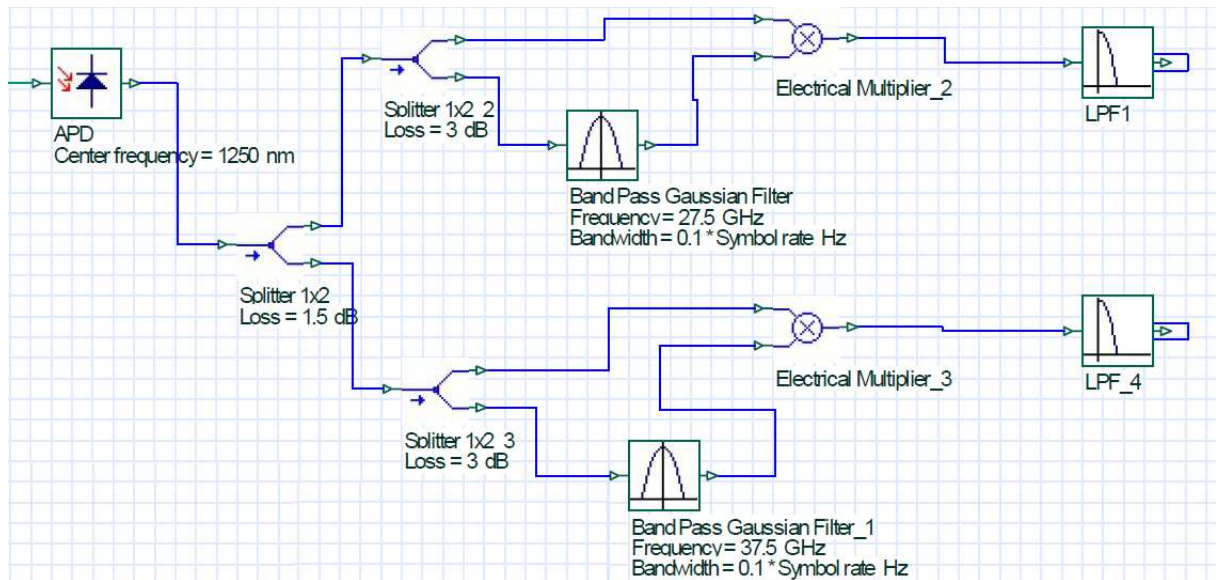
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Conforme apresentado na seção 3.1, os blocos C1, C2 e C3 são responsáveis por realizar a demodulação das portadoras ópticas, recuperando diretamente a informação de interesse no caso das portadoras em 1270nm e 1290nm. O bloco C1, responsável por recuperar a informação transmitida através das subportadoras de RF, é detalhado na Figura 7.

De acordo com a Figura 7, o sinal elétrico de saída do APD, proporcional à portadora óptica incidente, é conectado a um divisor de potência elétrica. A primeira saída do divisor de potência 1x2 é destinada à demodulação da informação contida na subportadora de RF de 27,5 GHz. Já a segunda saída do divisor de potências 1x2 diz respeito à demodulação da informação contida na subportadora de RF de 37,5 GHz. Para ambas as subportadoras de RF é realizada a demodulação coerente da banda base, conforme a descrição da topologia apresentada na seção 3.1, correspondente ao segundo divisor de potência elétrica, ao filtro passa banda e ao multiplicador elétrico, acoplados a cada uma das saídas do primeiro divisor de potência. Após a demodulação coerente, utiliza-se um filtro passa baixas para

eliminar ruidos em altas frequências e recuperar o sinal de banda base transmitido através de cada uma das subportadoras de RF.

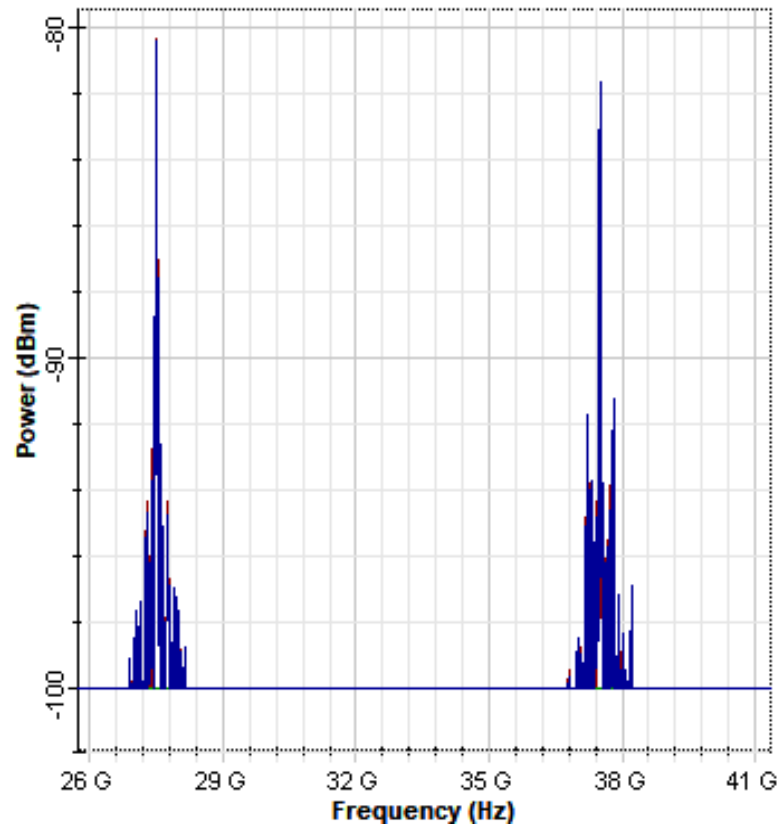
Figura 7 – Composição do bloco C1, responsável pela demodulação das suportadoras de RF.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

A Figura 8 demonstra o espectro logo após APD centrado em 1250nm, mostrado na Figura 7.

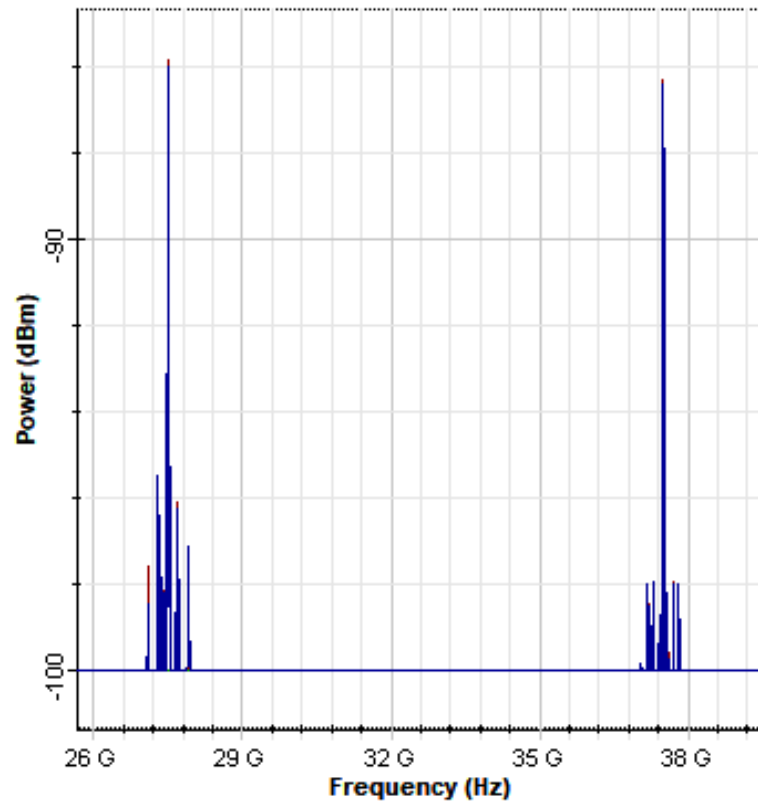
Figura 8 – Espectro elétrico após o APD centrado em 1250 nm da Figura 7.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Na Figura 8 é possível verificar as duas subportadoras de RF, sendo a primeira centrada na frequência de 27,5 GHz e a segunda na frequência de 37,5 GHz. Por sua vez, a Figura 9 representa o espectro de cada uma das saídas do primeiro divisor passivo elétrico da Figura 7.

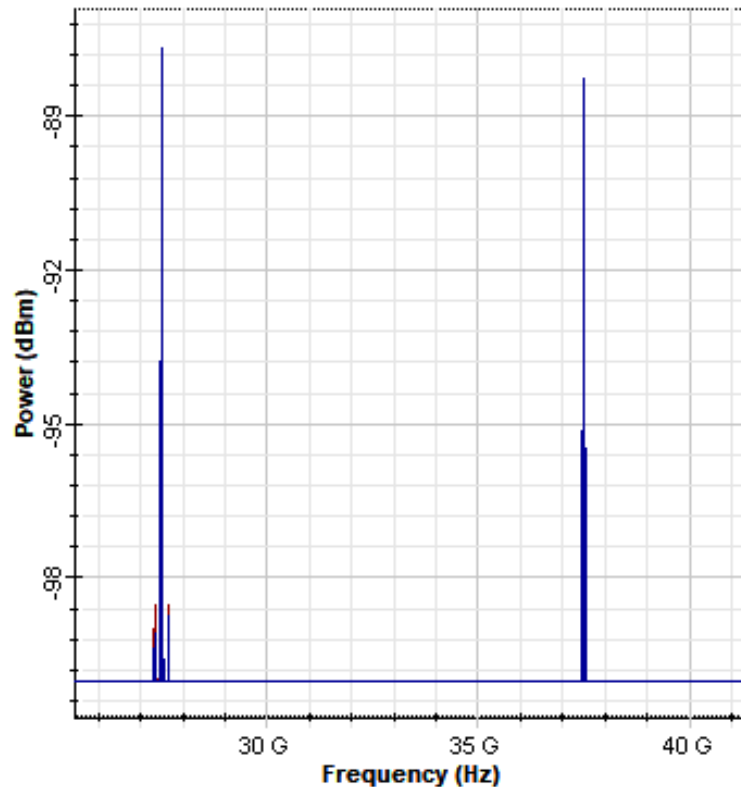
Figura 9 – Espectro elétrico após o primeiro divisor passivo 1x2 da Figura 7.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Os espectros das Figuras 8 e 9 são idênticos, à menos da perda de inserção do primeiro divisor passivo 1x2. A Figura 10 representa o espectro após o segundo divisor passivo 1x2 da Figura 7, cujas saídas se destinam à demodulação coerente, o qual possui a mesma forma do espectro da Figura 9, atenuado em 3 dB, conforme a perda de inserção do divisor.

Figura 10 – Espectro elétrico após o segundo divisor passivo 1x2 da Figura 7.

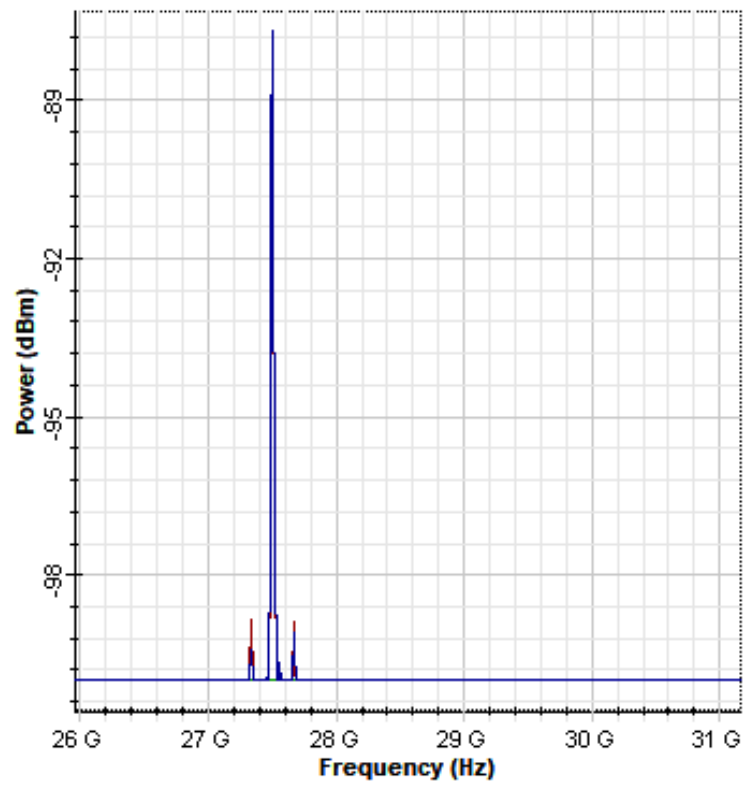


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Após o segundo divisor passivo, o sinal é dividido em duas partes, com 50% da potência em cada ramo. Uma parcela do sinal é submetida ao misturador enquanto a outra é filtrada por um filtro passa-banda, conforme a Figura 7. A Figura 11 demonstra o espectro após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz da Figura 7. Já a Figura 12 apresenta o espectro após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz.

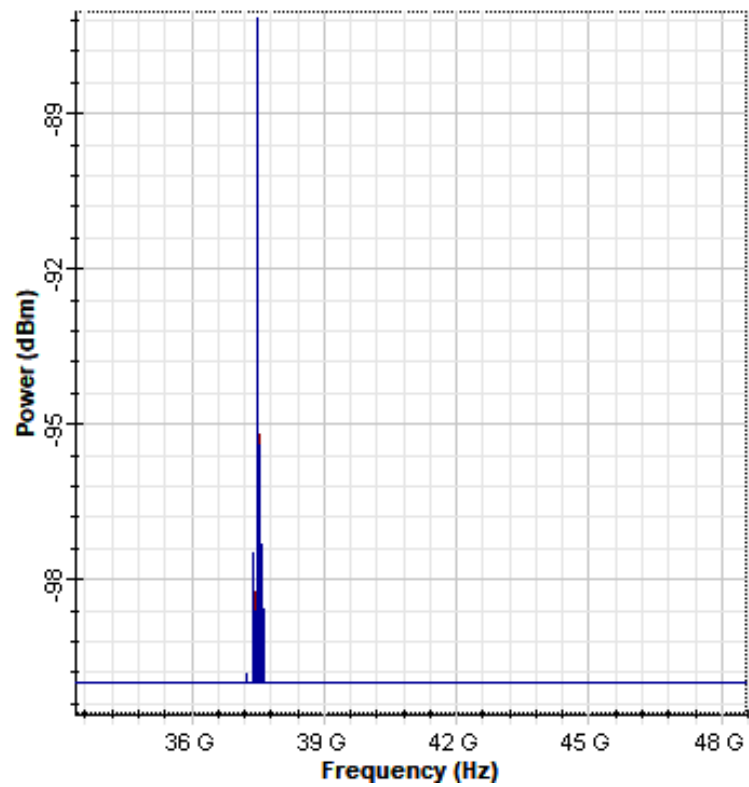
Esta seleção é realizada a fim de filtrar apenas a subportadora de RF de interesse. O sinal, depois de submetido à filtragem, é encaminhado ao misturador, o qual irá realizar o batimento homódino de cada subportadora. Na saída do misturador tem-se um sinal com frequência proporcional à diferença de frequências entre os sinais em batimento, o qual corresponde à banda base, ou seja, à informação de interesse.

Figura 11 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz da Figura 7.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 12 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz da Figura 7.



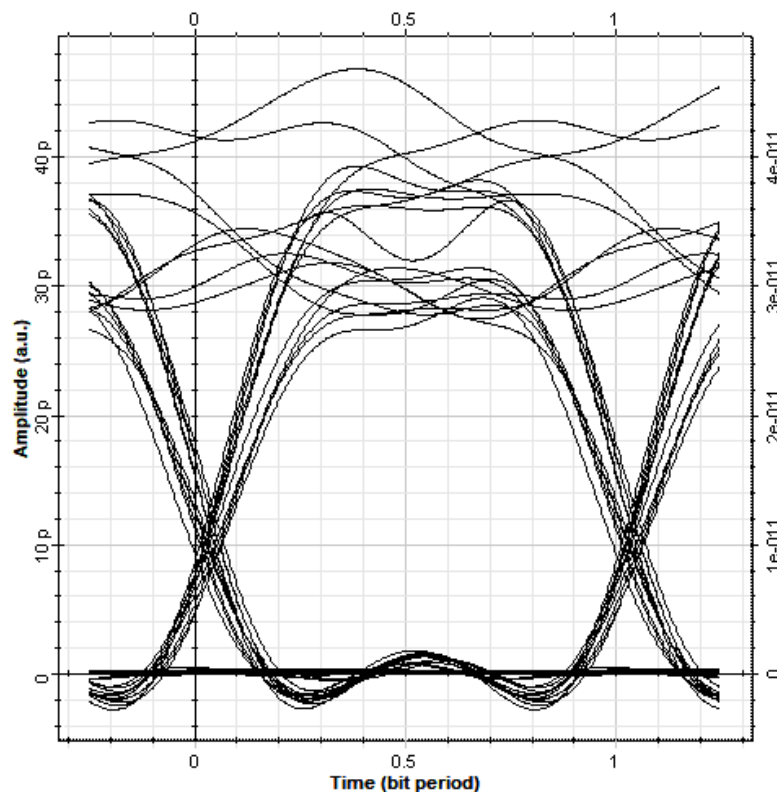
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Para as portadoras ópticas em 1270nm e 1290nm, a informação de interesse é recuperada diretamente após o APD, centrado na frequência de interesse.

Para avaliar a qualidade de comunicação da topologia proposta foram realizadas medidas de diagrama de olho (*Eye Diagram*) sobre os dados elétricos recebidos em todas as portadoras ópticas, além das correspondentes aferições da BER (*Bit Error Rate* ou taxa de erro de bit) e do fator Q (Fator de Qualidade), utilizando os blocos correspondentes aos equipamentos de medição disponíveis no software de simulação. Enquanto o diagrama de olho permite uma avaliação mais direta e qualitativa da qualidade de comunicação, a BER e o fator Q se destinam a uma avaliação quantitativa da qualidade de transmissão ao longo do canal (KEISER, 2014).

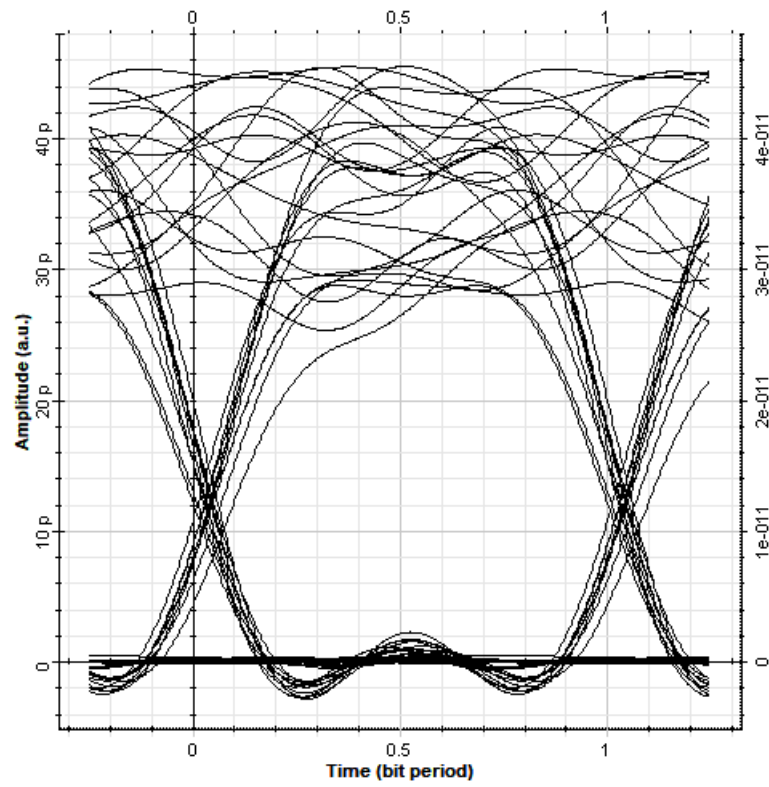
A seguir são apresentados os diagramas de olho para cada portadora óptica e subportadora de RF utilizada, no sentido de *downlink*.

Figura 13 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 27,5 GHz em 1250 nm.



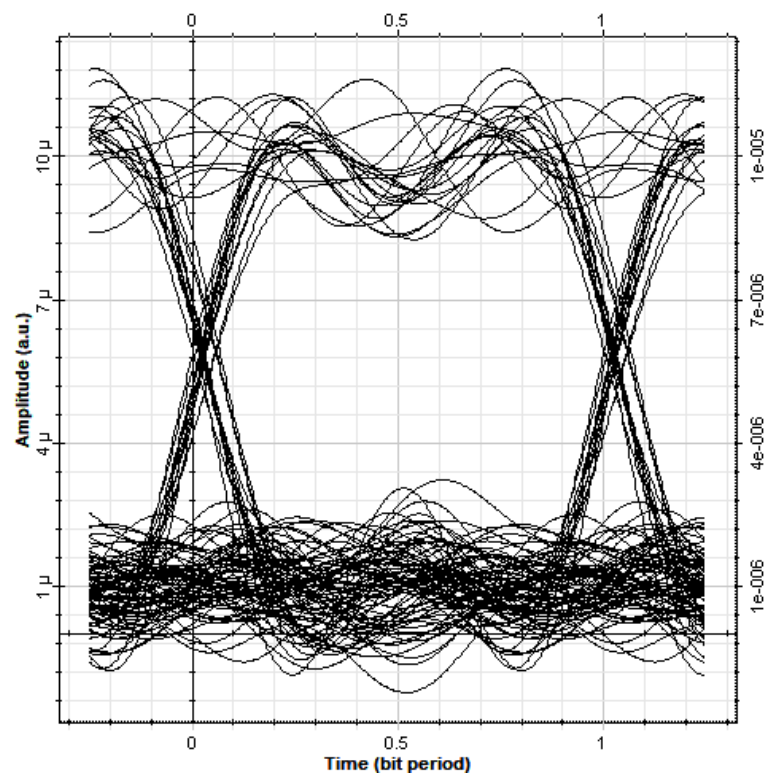
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 14 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1250nm.



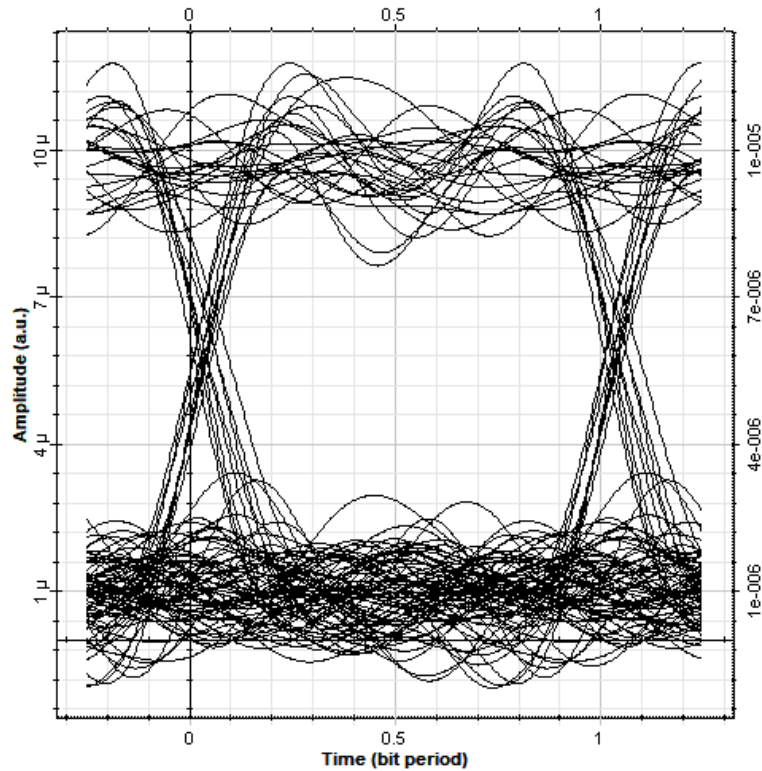
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 15 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1270 nm.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 16 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1290 nm.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Os resultados das Figuras 13 a 16 trazem diagramas de olho de grande abertura e com pouca largura nos pontos de cruzamento, o que indica boa qualidade de comunicação, com baixa dispersão, e antecipa a recuperação fidedigna da informação transmitida. As Figuras 13 e 14 indicam ainda que a penalidade de potência entre as subportadoras de RF foi corretamente compensada pelo aumento da potência de transmissão da portadora óptica correspondente.

A Tabela a seguir demonstra os valores referentes às medições da BER e do fator Q, relacionando-os com os diagramas de olho demonstrados nas Figuras 13, 14, 15 e 16.

Tabela 2 – Medição da BER_{MIN} e do Q_{MAX} referentes aos diagramas de olho capturados: *downlink*

Figura	BER_{MIN}	Q_{MAX}
13	1,50e-12	6,76
14	8,55e-14	7,21
15	1,77e-14	7,54
16	6,93e-14	7,39

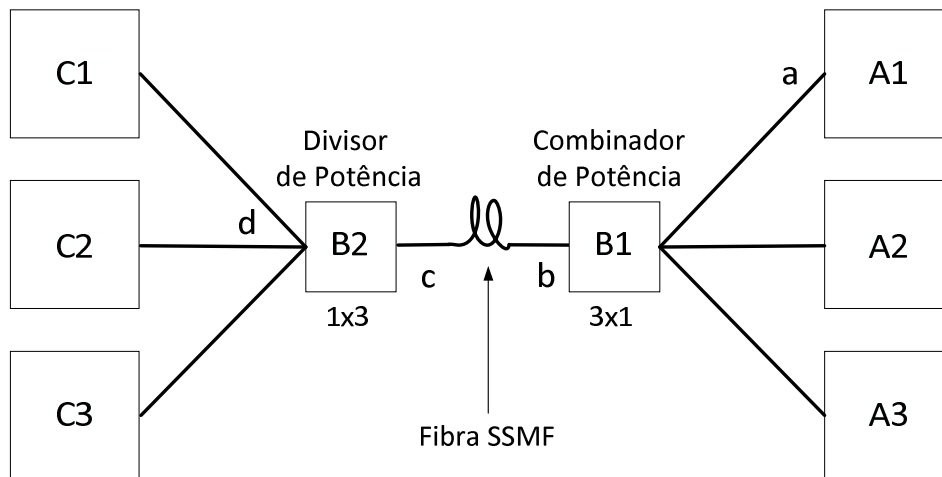
Fonte: Autor.

A qualidade da comunicação é comprovada através dos valores de BER e fator Q contidos na Tabela 2, onde taxa de erro alcançada foi da ordem de 10^{-12} , validando a topologia da rede PON proposta para a comunicação no sentido de *downlink*.

4.2 Propagação no sentido de *uplink*

Para a propagação no sentido de *uplink*, a Figura 2 continua sendo válida, porém pode ser analisada de forma invertida, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Diagrama de blocos da topologia de rede PON proposta: *uplink*.

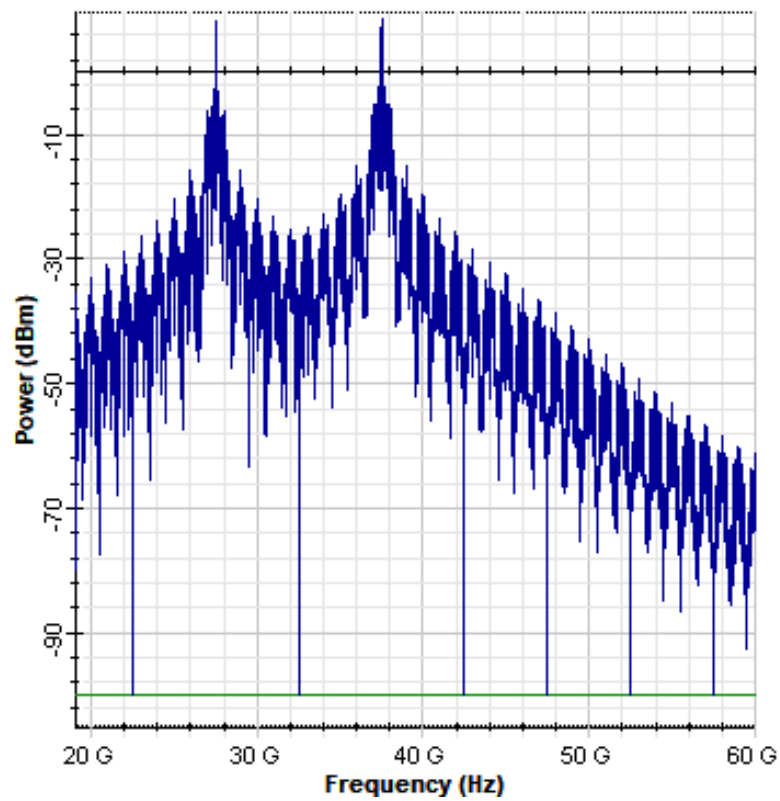


Fonte: Autor.

Neste caso, os blocos A1, A2 e A3 situam-se nas instalações do usuário e representam, analogamente ao sentido de propagação de *downlink*, os transmissores em 1310nm, 1330nm e 1350nm, respectivamente. O canal de 1310nm é responsável pela transmissão dos sinais das subportadoras de RF, centradas nas mesmas frequências de 27,5 GHz e 37,5 GHz. Já os canais de 1330nm e 1350nm são as portadoras ópticas destinadas ao tráfego de dados dos usuários da rede óptica passiva, conforme já detalhado na seção 3.1

A Figura 18 indica o espectro elétrico das duas subportadoras de RF combinadas, nas frequências de 27,5 GHz e 37,5 GHz, respectivamente, o qual foi obtido no ponto “a” da Figura 17.

Figura 18 – Espectro elétrico das duas subportadoras de RF combinadas: *uplink*, ponto “a” da Figura 17.

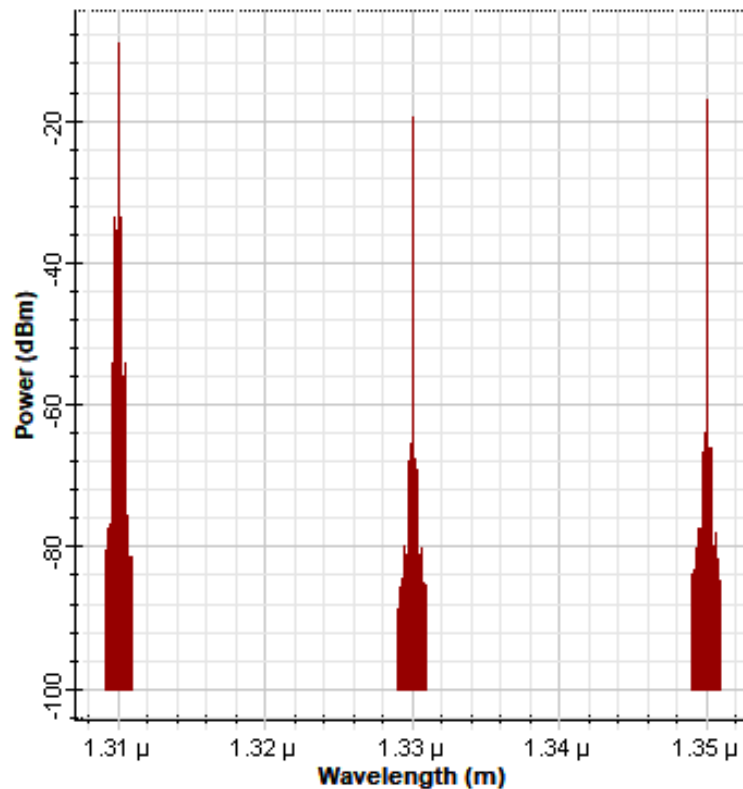


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

A Figura 19 apresenta o espectro após o combinador de potências 3x1, representado pelo ponto “b” da Figura 17.

Conforme pode ser verificado, existe uma diferença de intensidade entre as portadoras ópticas transmitidas. Esta diferença de intensidades é idêntica àquela observada para a propagação no sentido de *downlink*, onde a potência do canal de 1310nm teve de ser ajustada para 7,7 dBm, para compensar a penalidade de potência por *crosstalk* entre as subportadoras de RF, originada pelo compartilhamento do canal e do meio de propagação óptico. Já as potências de saída dos lasers DML nos canais de 1330nm e 1350nm, responsáveis pela transmissão exclusiva dos dados de usuários da rede PON no sentido de *uplink*, foram ajustadas para -1,7 dBm e -1,8 dBm, respectivamente.

Figura 19 – Espectro óptico após o combinador de potências B1: *uplink*, ponto “b” da Figura 17.

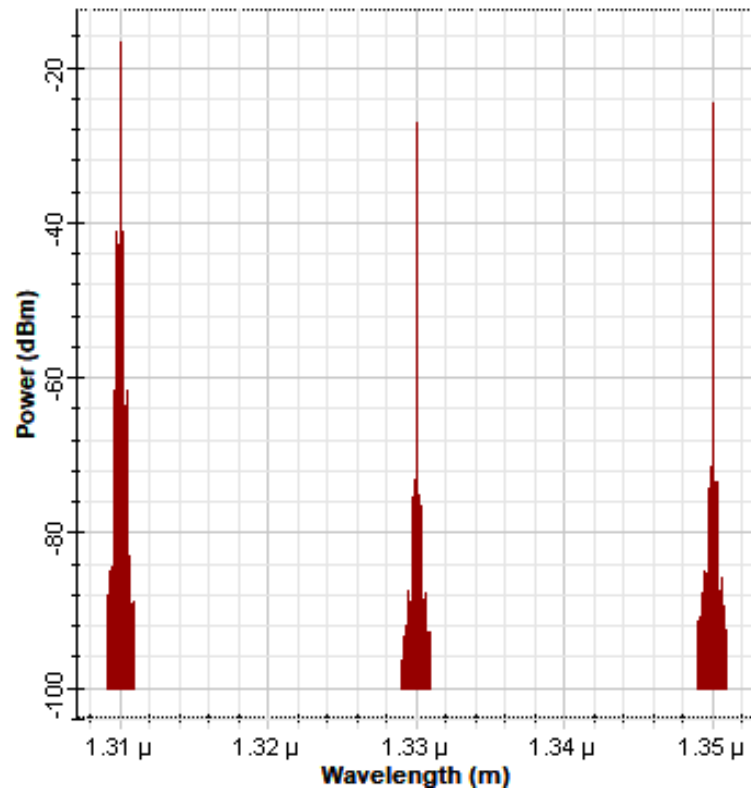


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

As portadoras ópticas combinadas são então transmitidas pela mesma fibra óptica SSMF de 20 km utilizada no sentido de *downlink*, com atenuação de 0.38 dB/km na banda O. A Figura 20 apresenta o espectro após a transmissão dos sinais pela fibra óptica, referente ao ponto “c” da Figura 17.

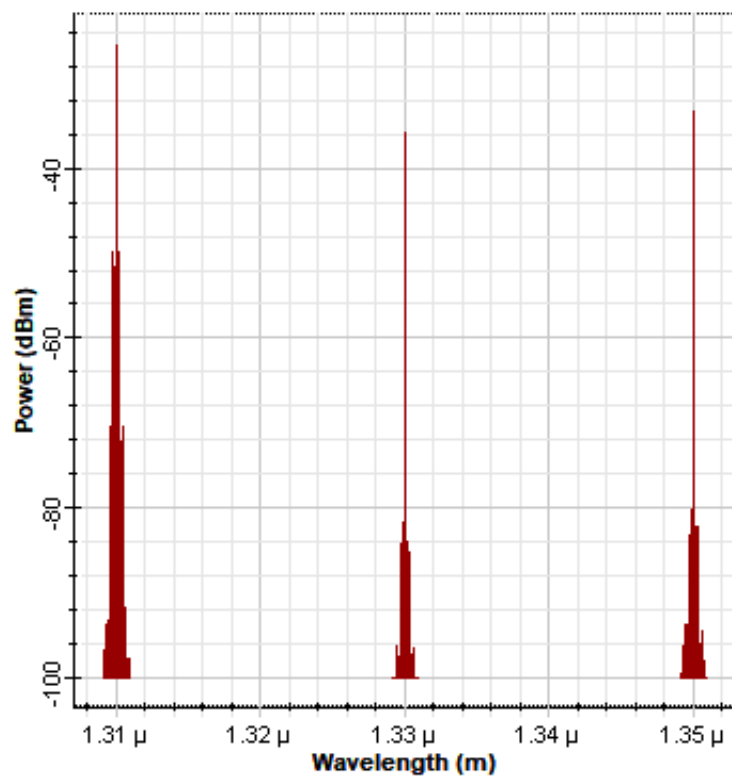
Após a propagação na fibra, os sinais são submetidos ao divisor óptico passivo 1x3, representado pelo bloco B2. Convém lembrar que cada uma das saídas do divisor passivo apresenta o mesmo espectro. Além disto, e como o divisor utilizado possui uma perda de inserção de 4 dB, os sinais manterão a mesma forma daqueles da Figura 20, porém atenuados em 4 dB. A Figura 21 ilustra o espectro resultante, referente ao ponto “d” da Figura 17.

Figura 20 – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra SSMF: *uplink*, ponto “c” da Figura 17.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 21 – Espectro óptico após o divisor passivo 1x3: *uplink*, ponto “d” da Figura 17.

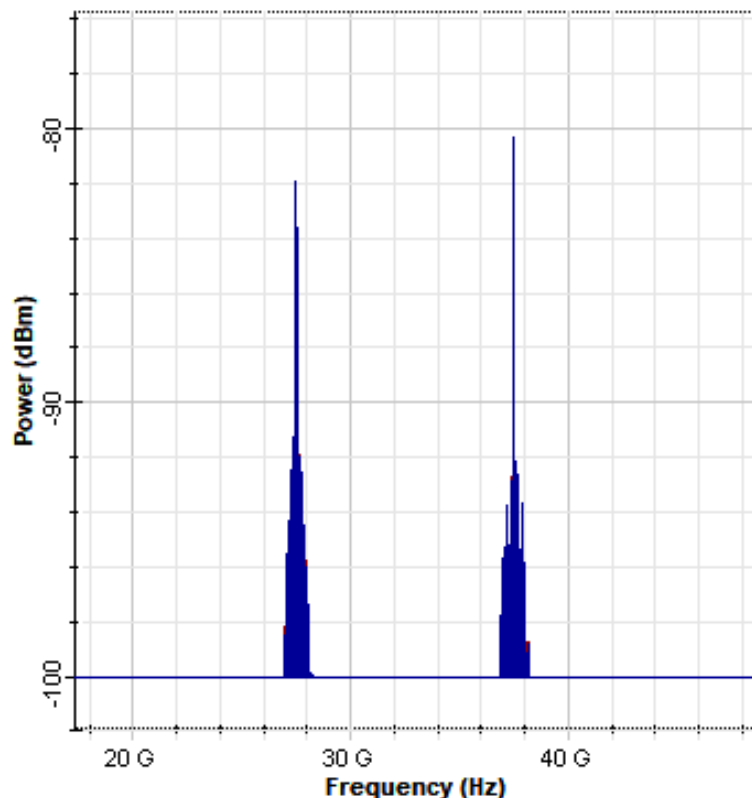


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Após o divisor passivo 1x3, os sinais são encaminhados aos respectivos blocos de demodulação C1, C2 e C3. O bloco C1 é responsável por realizar a demodulação da informação contida nas subportadoras de RF, cujos componentes são apresentados na Figura 7, diferindo do sentido de transmissão *downlink* apenas na frequência central do APD, 1310nm neste caso.

A Figura 22 demonstra o espectro logo após APD centrado em 1310nm.

Figura 22 – Espectro elétrico após o APD centrado em 1310 nm: *uplink*.

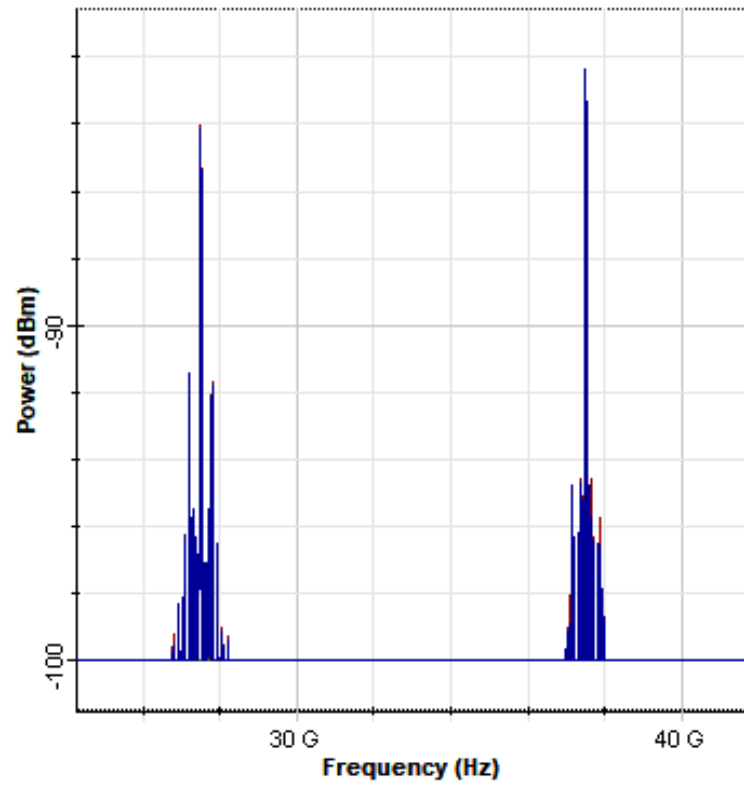


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

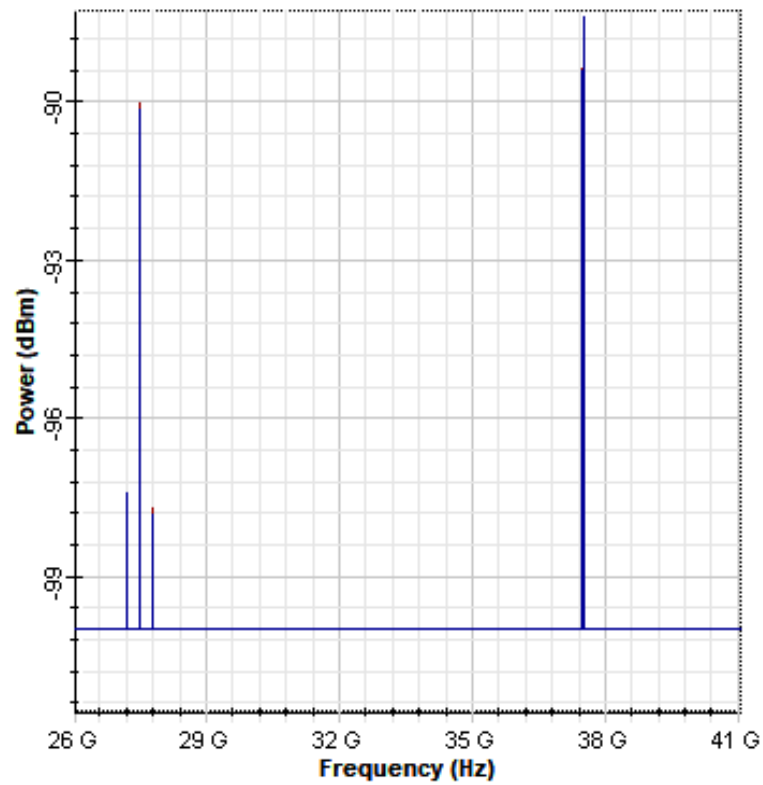
Na Figura 22 é possível verificar as duas subportadoras de RF, sendo a primeira centrada na frequência de 27,5 GHz e a segunda na frequência de 37,5 GHz, analogamente à transmissão no sentido de *downlink*.

A Figura 23 representa o espectro após o primeiro divisor passivo após o APD, onde as duas saídas apresentam o mesmo espectro.

Após o primeiro divisor passivo, o sinal é submetido a uma nova divisão em duas partes, com 50% da potência em cada ramo. Uma parcela do sinal é submetida ao misturador enquanto a outra é filtrada por um filtro passa-banda, conforme a Figura 7. A Figura 24 demonstra o espectro após o segundo divisor passivo.

Figura 23 – Espectro elétrico após o primeiro divisor passivo 1x2: *uplink*.

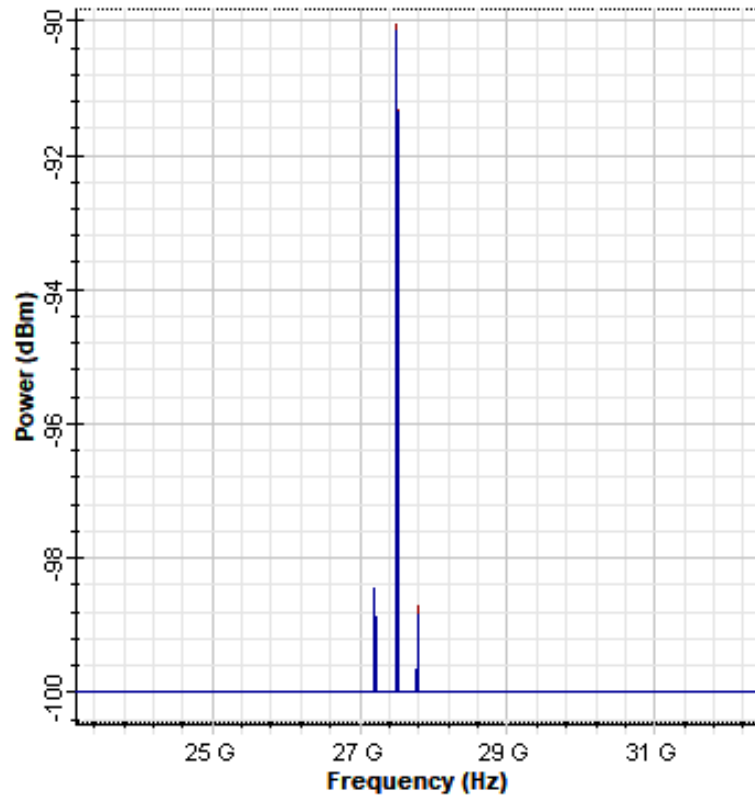
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 24 – Espectro elétrico após o segundo divisor passivo 1x2: *uplink*.

Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

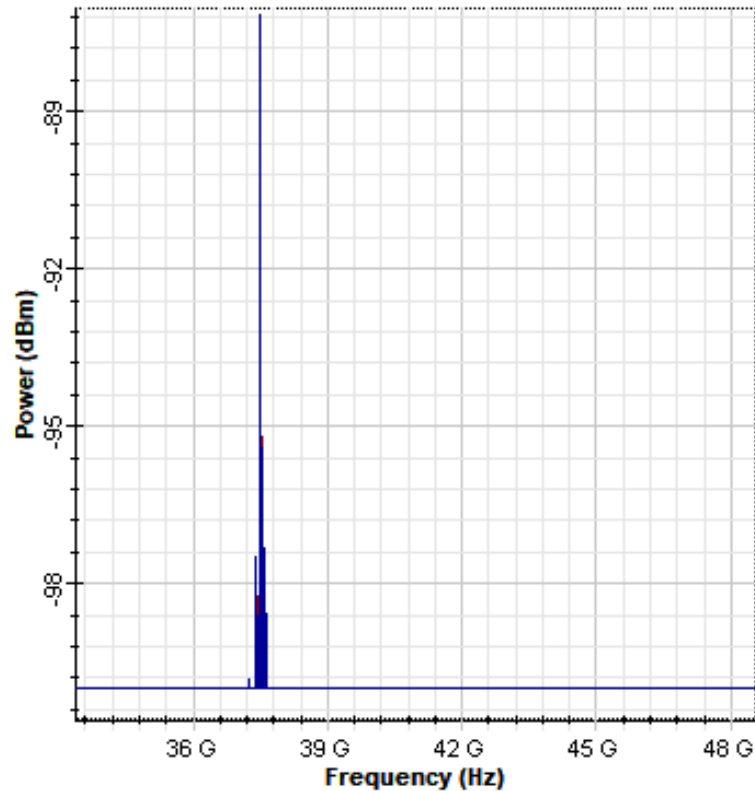
Após o segundo divisor elétrico passivo, o sinal é filtrado de acordo com a frequência de interesse. A seguir estão representados os espectros após os filtros passa-banda, para cada uma das suportes utilizadas para transmissão *uplink*.

Figura 25 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda (27,5 GHz): *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 26 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda (37,5 GHz): *uplink*.



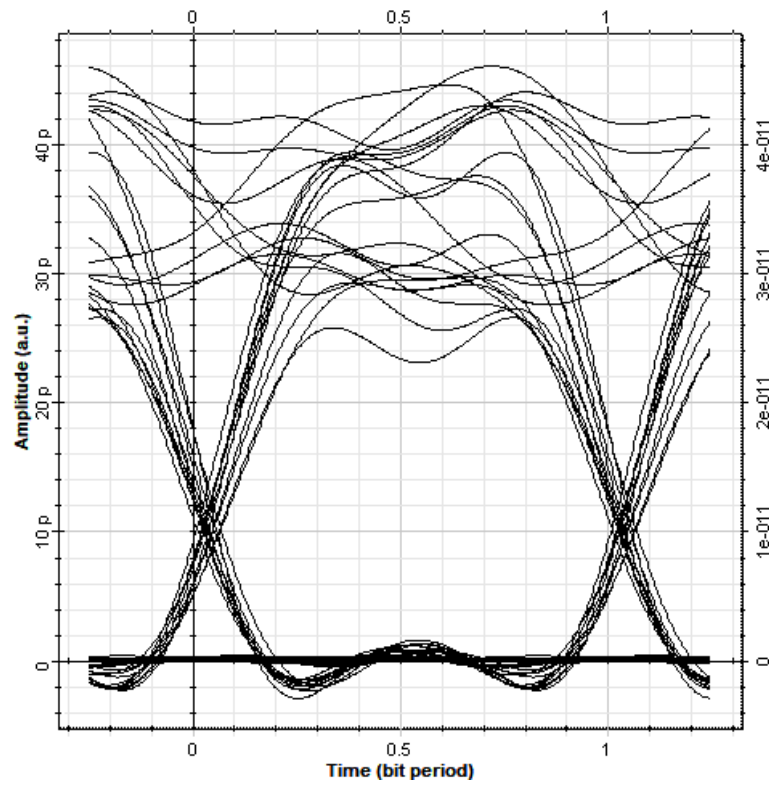
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Para as portadoras ópticas em 1330nm e 1350nm, a informação de interesse é recuperada diretamente após o APD, centrado na frequência de interesse.

Novamente, para avaliar a qualidade do canal de comunicação foram realizadas medidas de diagrama de olho sobre os dados elétricos recebidos, além das correspondentes aferições da BER e do fator Q.

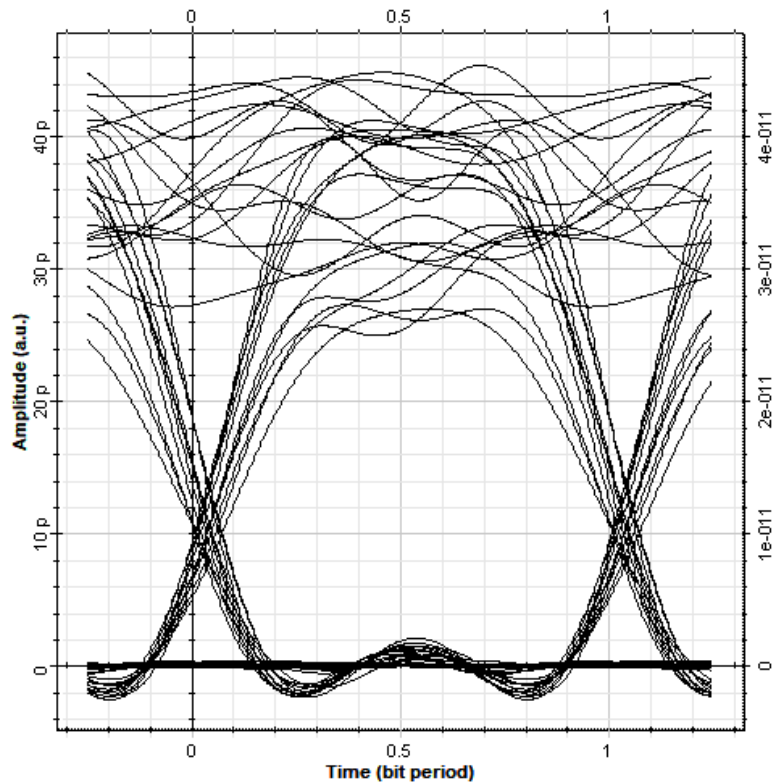
As Figuras 27, 28, 29 e 30 apresentam os diagramas de olho para cada portadora óptica e subportadora de RF utilizada, no sentido de *uplink*.

Figura 27 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 27,5 GHz em 1310 nm.



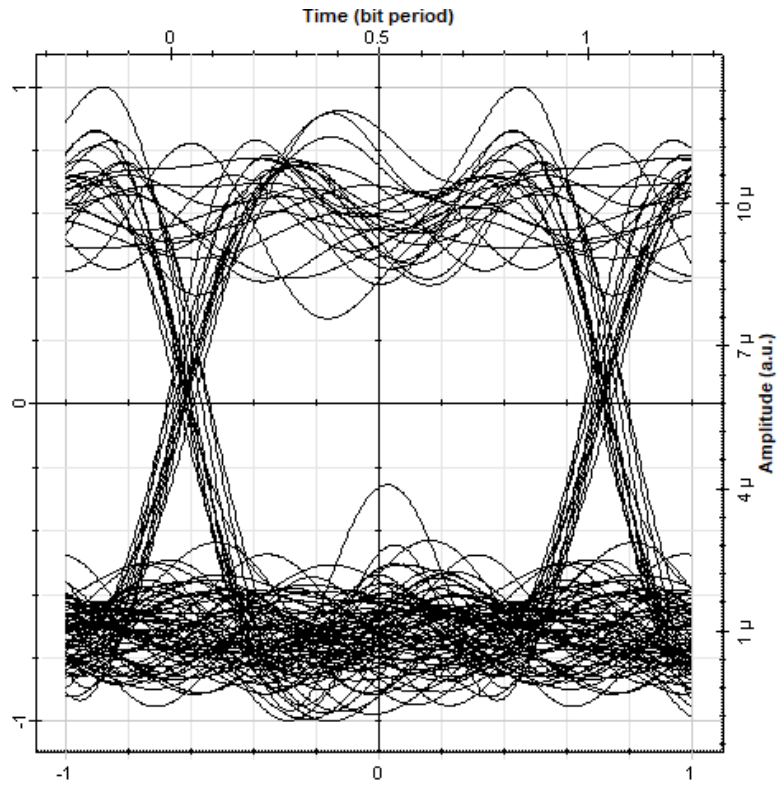
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 28 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1310 nm.



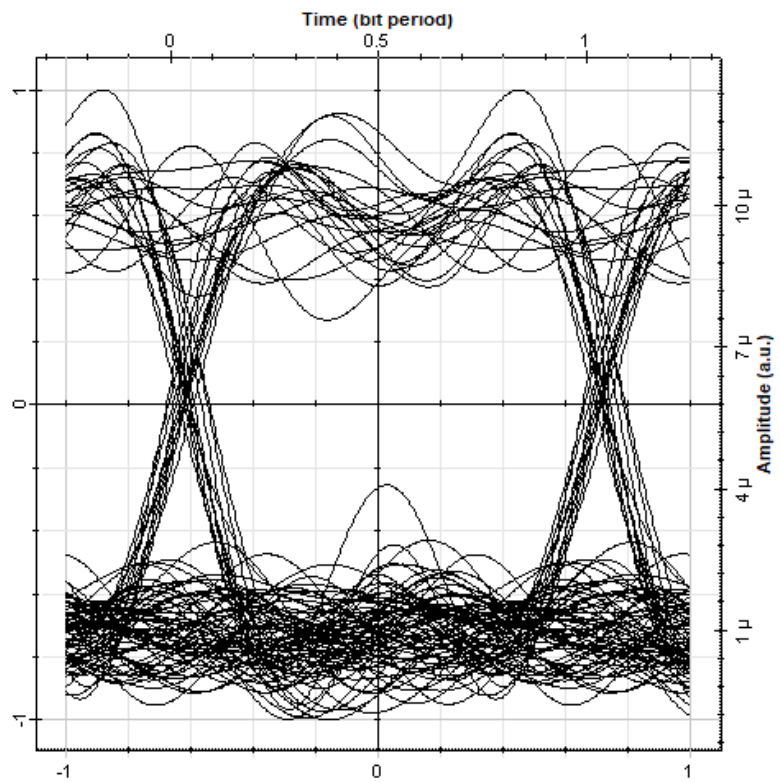
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 29 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1330 nm.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 30 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1350 nm.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Como no caso da transmissão no sentido de *downlink*, os resultados das Figuras 27 a 30 trazem diagramas de olho de grande abertura e com pouca largura nos pontos de cruzamento, o que indica boa qualidade de comunicação, com baixa dispersão, e antecipa a recuperação fidedigna da informação transmitida. As Figuras 27 e 28 indicam ainda que a penalidade de potência entre as subportadoras de RF foi corretamente compensada pelo aumento da potência de transmissão da portadora óptica correspondente.

A Tabela a seguir demonstra os valores referentes às medições da BER e do fator Q, relacionando-os com os diagramas de olho demonstrados nas Figuras 27, 28, 29 e 30.

Tabela 3 – Medição da BER_{MIN} e do Q_{MAX} referentes aos diagramas de olho capturados: *uplink*

Figura	BER_{MIN}	Q_{MAX}
27	2,41e-12	6,72
28	2,14e-12	6,75
29	1,41e-13	7,28
30	2,32e-14	7,52

Fonte: Autor.

A qualidade da comunicação é comprovada através dos valores de BER e fator Q contidos na Tabela 3, uma vez que a taxa de erro da ordem de 10^{-12} foi alcançada, validando a topologia da rede PON proposta também para a comunicação no sentido de *uplink*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma nova topologia de rede PON com capacidade para atender a demanda agregada de tráfego de dados das futuras redes *wireless* 5G. Para isso, fez-se uso da banda O (na janela de transmissão de 1310 nm), empregando lasers de modulação direta, transmissão NRZ e detecção coerente, sem empregar amplificação óptica.

Conforme demonstrado, a topologia proposta, que multiplexa os dados no domínio analógico fazendo uso da técnica A-RoF, permite alcançar uma economia de 99% da banda passante disponível no canal óptico quando comparada com a multiplexação digital do sinal proveniente da interface CPRI, utilizada nas redes *wireless* atuais (ITU-T, 2018) e em adaptação para o padrão 5G, considerando-se uma modulação digital em amplitude do tipo OOK (*ON-OFF-Keying* ou chaveamento liga-desliga) e, em ambas as análises, o mesmo número de antenas empregadas para atendimento da demanda de dados da rede *wireless*.

Os resultados das medições apresentados, com BER da ordem de 10^{-12} ou mesmo inferior, comprovam, quantitativamente, a qualidade da comunicação da topologia de rede PON proposta. Este desempenho, a economia de banda-passante óptica demonstrada e as características técnicas apresentadas credenciam a topologia proposta não apenas à transmissão de dados do novo padrão *wireless* 5G, mas também à expansão do tráfego agregado das redes *wireless* 5G, como o que é esperado em função do crescimento das aplicações IoT (internet das coisas ou *Internet of Things*), sem impacto na qualidade da comunicação dos demais usuários e sem que isto signifique custo incremental por aumento de capacidade da rede óptica passiva.

Assim, a realização do trabalho apresentado contribuiu imensamente na formação acadêmica, agregando conhecimentos específicos da área de Comunicações Ópticas. A execução do estudo possibilitou experiências teóricas e práticas, desenvolvendo conceitos relacionados aos dispositivos utilizados atualmente e futuramente em Redes Ópticas Passivas.

Os resultados obtidos no trabalho apresentado abrem caminhos para trabalhos futuros, podendo, a topologia proposta, ser utilizada em diversas aplicações que, com o advento das tecnologias 5G e IoT, prometem requerer altíssimas taxas de dados agregados. Algumas destas aplicações relacionadas ao

5G são realidade virtual, jogos *online* e vídeos *on demand*. Em relação ao IoT, destacam-se as *smart homes*, *self-driving cars*, *web surgery*, entre outras.

TRABALHO SUBMETIDO À PUBLICAÇÃO

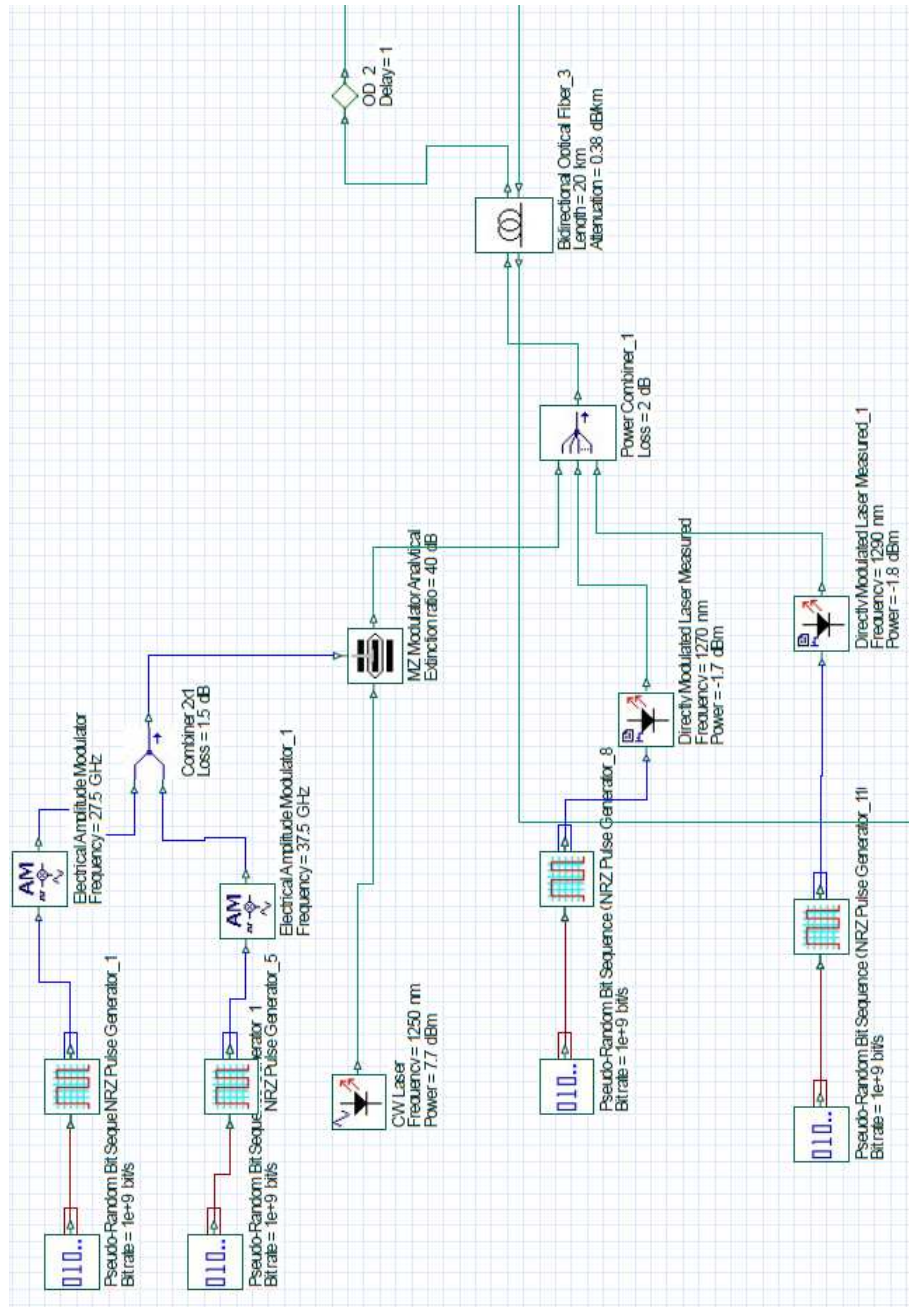
JOHANN, C. D., THOMAS, D. H. *A New Passive Optical Network Topology to Achieve 5G Fixed-Mobile Convergence*. IEEE Latin America Transactions, 2019.

REFERÊNCIAS

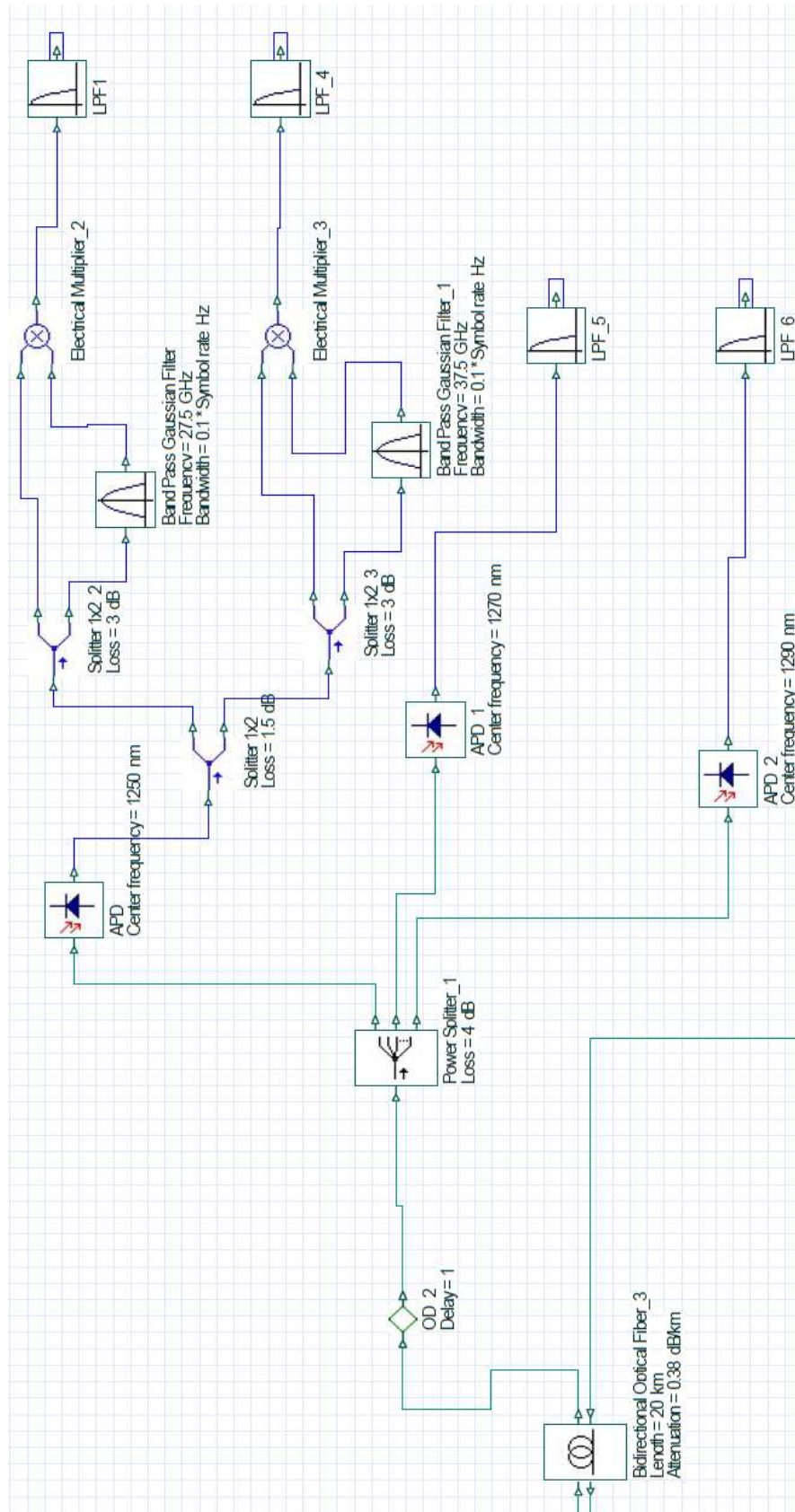
- BEHRENS, C., KRAUß, S., WEISS, E., BREUER, D., *Technologies for Convergence of Fixed and Mobile Access: An Operator's Perspective [Invited]*. J. Opt. Commun. Netw. 10, A37-A42 (2018). Citado na página 27.
- HARSTEAD, E., VEEN, D., HOUTSMA, V., DOM, P. *Technology Roadmap for Time-Division Multiplexed Passive Optical Networks (TDM PONs)*. Journal of Lightwave Technology, V. 37, 2019. Citado na página 26.
- ITU-T, "Transport network support of IMT-2020/5G," Int. Telecommun. Union, Geneva, Tech. Rep. GSTR-TN5G, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 60.
- KEISER, G. *Comunicações Por Fibras Ópticas*. (4. ed. – Porto Alegre: AMGH, 2014). Citado 3 vezes nas páginas 28, 31 e 45.
- KWON, Y. K. et al. *Optical transceiver for CWDM networks with multi subchannel Interface*. OFC, 2014. Citado na página 25.
- NOKIA. *Two Worlds Collide*. Technical White Paper, 2016. Citado na página 26.
- RAMALHO, L., FONSECA, M., KLAUTAU, A., LU, C., BERG, M., TROJER, E., HÖST, S. *An LPC-Based Fronthaul Compression Scheme*. IEEE Communications Letters 2017. Citado na página 26.
- RODRIGUES, C., MENDES, M.T., RUIVO, M. F., MÃO-CHEIA, P., SALGADO, J. *NG-PON2*. Paper "Innovation", 2018. Citado na página 24.
- SALEH, A. H., GREGORY, M. *The Next Generation of Passive Optical Networks: A Review*. Journal of Network and Computer Applications, 2016. Citado na página 26.
- TAYQ, Z. *Fronthaul integration and monitoring in 5G networks*. Signal and Image processing. Université de Limoges, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- ZHANG, L., CHEN, J., WOSINSKA, L., URBAN, P., XIAO, S., HU, W. *Fixed and Mobile Convergence with Stacked Modulation*. ONDM, 2018. Citado na página 25.
- ZHANG, J., XU, M., WANG, J., LU, F., CHENG, L., CHO, H., YING, K., YU, J., CHANG, G. K. *Full-Duplex Quasi-Gapless Carrier-Aggregation Using FBMC in Centralized Radio-Over-Fiber Heterogeneous Networks*, in Journal of Lightwave Technology, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017. Citado na página 25.

APÊNDICES

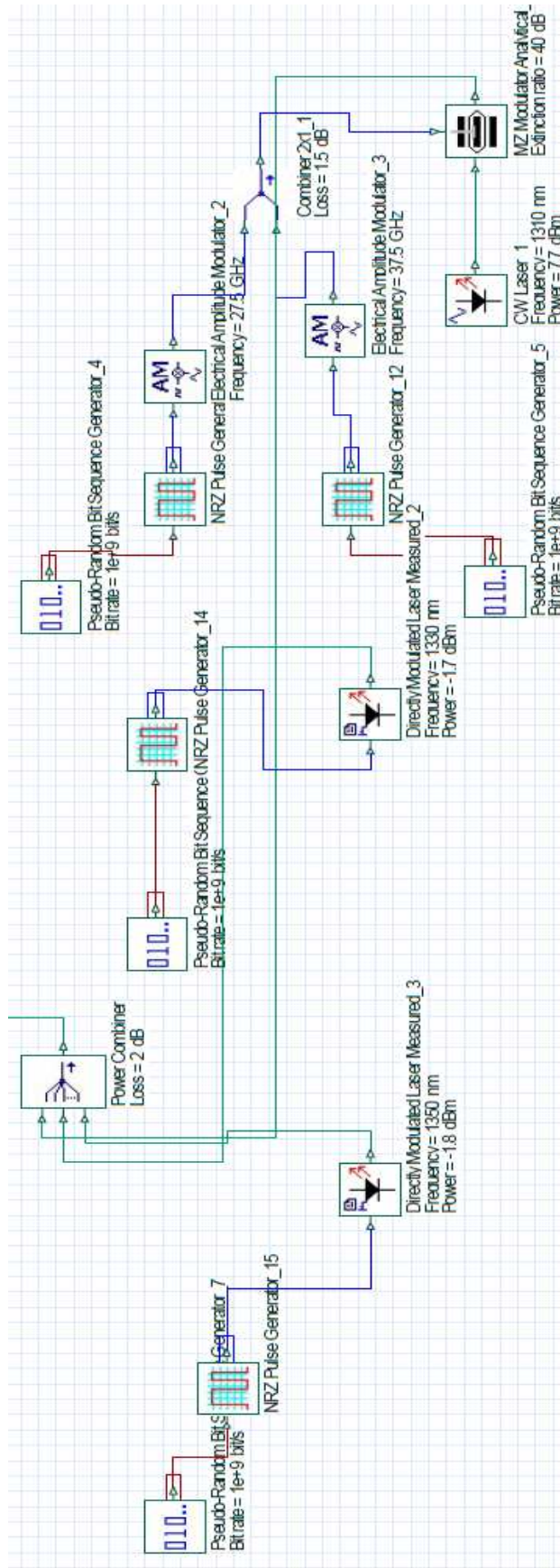
A – Geração dos blocos A1, A2 e A3 da Figura 2 no *software* OptiSystem.



B – Geração dos blocos C1, C2 e C3 da Figura 2 no *software* OptiSystem.



C – Geração dos blocos A1, A2 e A3 da Figura 17 no *software* OptiSystem.



D – Geração dos blocos C1, C2 e C3 da Figura 17 no *software* OptiSystem.

