

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**SINARA CORRÊA DE MATOS**

**SISTEMA DE COMUNICAÇÃO PARA DISPOSITIVOS IOT DAS REDES  
ELÉTRICAS INTELIGENTES BASEADO EM UMA REDE ÓPTICA TWDM-PON**

**Alegrete  
2019**



**SINARA CORRÊA DE MATOS**

**SISTEMA DE COMUNICAÇÃO PARA DISPOSITIVOS IOT DAS REDES  
ELÉTRICAS INTELIGENTES BASEADO EM UMA REDE ÓPTICA TWDM-PON**

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.

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).

M433s Matos, Sinara Corrêa de

Sistema de comunicação para dispositivos IoT das  
redes elétricas inteligentes baseado em uma rede óptica  
TWDM-PON / Sinara Corrêa de Matos.

90 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE  
TELECOMUNICAÇÕES, 2019.

"Orientação: Djeisson Hoffmann Thomas".

1. Redes ópticas TWDM-PON. 2. redes wireless 5G. 3.  
dispositivos IoT. 4. smart grids. 5. smart meters. I.  
Título.

SINARA CORRÊA DE MATOS

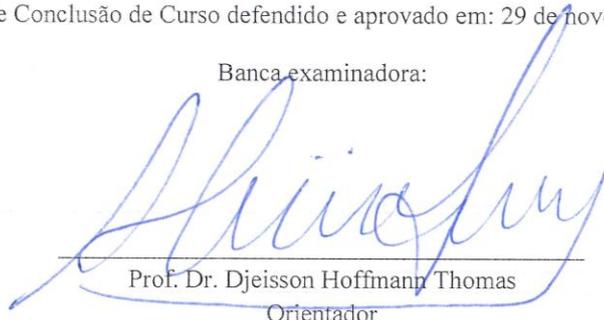
**SISTEMA DE COMUNICAÇÃO PARA DISPOSITIVOS IOT DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES  
BASEADO EM UMA REDE ÓPTICA TWDM-PON**

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: Rádiofrequência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de novembro de 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Djeisson Hoffmann Thomas  
Orientador



Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes  
UNIPAMPA



Prof. Dr. Marcos Vinício Thomas Heckler  
UNIPAMPA



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e pela oportunidade de realizar um grande sonho.

Sou imensamente grata pela minha mãe, Leisa Corrêa, por todo esforço e dedicação à mim em todos esses anos longe de casa. Sempre me ouvindo e apoiando, independente da situação. Minha irmã, Siméia Matos, também merece toda a minha gratidão: por me apoiar nos momentos difíceis e por ser minha melhor amiga e exemplo de vida.

Durante a faculdade conheci algumas pessoas que se tornaram minha família: Nidia e Daniel Cherolt. Obrigada por todos esses anos de convivência, conselhos e apoio incondicional. Vocês são parte essencial dessa conquista e eu não teria conseguido sem vocês.

Sou grata pelos amigos que fiz durante esse período e que tornaram meus dias muito mais felizes. Obrigada Arielly Rodrigues pelo apoio em todos os momentos e pelas inúmeras horas de conversa, independente da distância sempre está “presente” nos meus dias. Obrigada Melissa Bilher e Joe Lenon pelas risadas, pelos momentos de estudo, pelas palavras de apoio e por todos os momentos que passamos juntos. Obrigada Daniela Busanello por todos esses anos de companheirismo e amizade.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação, especialmente ao prof. Djeisson Hoffmann Thomas, pela orientação e por todas as horas dedicadas à esta pesquisa, assim como pela paciência em ensinar e responder as dúvidas referentes ao trabalho.

Obrigada a todos que fizeram parte neste processo!



*“Porque dele, e por ele, e para ele são todas as coisas”.*

*(Romanos 11:36)*



## RESUMO

As redes elétricas inteligentes (*smart grids*) surgiram com o objetivo de automatizar as operações necessárias à distribuição de energia entre os pontos de geração e os consumidores finais. Para que isso aconteça é imprescindível que as redes *smart grids* disponham de um sistema de comunicação apropriado, seguro, confiável, com taxa de dados adequada, de baixo ruído, de longo alcance e financeiramente viável, dada a extensão e, por conseguinte, a escala de dispositivos que compõem as *smart grids*. No que se refere à comunicação em última milha (*last mile*), em boa parte estes requisitos serão atendidos com o advento do novo padrão de comunicação *wireless* 5G, superior aos padrões atuais não apenas em termos da taxa de dados, mas também em confiabilidade e segurança. A disponibilidade deste novo padrão de comunicação *wireless* com desempenho superior viabilizará a popularização das mais variadas aplicações dos dispositivos IoT (*Internet of Things* ou “internet das coisas”), dispositivos conectados à rede de dados e capazes de se comunicar sem a interferência humana. Esta também é a tendência das *smart grids*, cujos dispositivos serão progressivamente convertidos para o padrão IoT. Dentre estes dispositivos estão os *smart meters*, os medidores de energia inteligentes, os quais estarão conectados à rede 5G através da interface apropriada. No entanto, provavelmente a banda passante da conexão *wireless* 5G não será suficiente para dar suporte ao tráfego agregado dos múltiplos *smart meters*, dos incontáveis dispositivos IoT (muitos deles ainda inimagináveis) e dos também inúmeros usuários das redes de dados *wireless*, em função do padrão de multiplexação digital empregado nas interfaces rádio CPRI (*Common Public Radio Interface* ou Interface Rádio Pública Comum). Faz-se necessário, portanto, propor topologias de comunicação capazes de suportar este grande tráfego agregado de dados. Dentre as tecnologias disponíveis, aquela que comprovadamente apresenta maior potencial para o atendimento desta demanda é a fibra óptica, caracterizada por ser um guia de onda de larga banda passante, além de ser um meio de propagação dielétrico (imune à interferência eletromagnética) e de baixas perdas (capaz de transmitir o sinal óptico por grandes distâncias). Partindo destes pressupostos, neste trabalho propomos uma topologia de comunicação baseada no novo padrão de redes ópticas passivas (PON) de acesso chamadas *TWDM-PON* (*Time and Wavelength Division Multiplexing PON* ou PON com multiplexação no tempo e em comprimento de onda),

que emprega a multiplexação analógica da portadora óptica por subportadoras de RF, como nos sistemas ROF (*radio-over-fiber* ou rádio-sobre-fibra), com o intuito de economizar banda passante para a multiplexação dos dados dos diversos usuários *wireless*, sejam eles clientes 3G, 4G ou 5G. Em função disto, a topologia proposta é capaz de dar suporte ao tráfego agregado dos dispositivos IoT a compor as *smart grids*, em especial os *smart meters*, sem prejuízo à qualidade de comunicação de dados dos demais usuários da rede *wireless* e também da rede PON.

Palavras-Chave: redes ópticas TWDM-PON, redes *wireless* 5G, dispositivos IoT, *smart grids*, *smart meters*.



## ABSTRACT

Smart grids automated the operations required for energy distribution between generation points and final consumers. To accomplish this, then must have an appropriate, secure, reliable, adequate data, low-noise, long-range and financially viable communication system, given the extension of the smart grids and, consequently, the number of devices of this kind of networks. The 5G is a new wireless communication standard, which performance is higher than current standards not only in terms of data rate but also in reliability and safety. This high performance enables the popularization of the most varied IoT applications (IoT - Internet of Things), connected to the data network and capable of communicating without human interference. This is also the trend of smart grids, whose devices will be progressively converted to the IoT standard. The smart meters will be connected to the 5G network through an appropriate interface. However, the wireless 5G communication standard probably will not be enough to support the aggregate traffic of multiple smart meters, countless IoT devices (many of them still unimaginable), and numerous users of wireless data networks, due the standard digital multiplexing pattern employed by the interface used in Common Public Radio Interface (CPRI). Therefore, it is necessary to propose communication topologies capable of supporting this fast growing data traffic. Among the available technologies, the one that has been shown to have the greatest potential to meet this demand is optical fiber, characterized by being a broadband pass-through waveguide, as well as being a mean of dielectric propagation (immune to electromagnetic interference) and low losses (capable of transmitting the optical signal over long distances). Based on these assumptions, this work proposes a communication topology based on the new pattern of passive optical networks access (PON) called Time and Wavelength Division Multiplexing PON (TWDM-PON). It employs time and wavelength multiplexing combined to analog carrier multiplexing of RF subcarriers, such as radio-over-fiber (ROF) systems, to save bandwidth for multiplexing data from multiple wireless users, whatever they are 3G, 4G or 5G clients. As a result, the proposed topology is capable of supporting the aggregate data traffic of IoT devices composing smart grids, especially smart meters, without prejudice to the data communication quality of other users of the wireless network as well as the PON network.

Keywords: *TWDM-PON optical networks, 5G wireless networks, IoT devices, smart grids, smart meters.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Arquitetura da <i>smart grid</i> apresentando sistemas de potência, fluxo de potência e fluxo de informação.....	27
<b>Figura 2</b> – Conceito geral de “medição inteligente de energia” .....	29
<b>Figura 3</b> – Arquitetura de uma típica rede óptica passiva.....	32
<b>Figura 4</b> – Multiplexação por divisão de tempo dos dados dos <i>smart meters</i> .....	38
<b>Figura 5</b> – Topologia proposta utilizando a técnica de multiplexação A-RoF – Transmissão .....	39
<b>Figura 6</b> – Topologia proposta utilizando a técnica de multiplexação A-RoF – Recepção .....	41
<b>Figura 7</b> – Topologia proposta para multiplexação TDM dos dados - Transmissão. ....	42
<b>Figura 8</b> – Funcionamento da chave óptica “Y Select” .....	43
<b>Figura 9</b> – Topologia proposta para demultiplexação dos dados – Recepção .....	44
<b>Figura 10</b> – Diagrama de olho referente aos dados do primeiro <i>smart meter</i> da Figura 7 .....	50
<b>Figura 11</b> – Diagrama de olho referente aos dados do segundo <i>smart meter</i> da Figura 7 .....	51
<b>Figura 12</b> – Espectro óptico após a combinação das subportadoras de RF - <i>downlink</i> .....	52
<b>Figura 13</b> – Espectro óptico após o combinador de potência 3x1 no sentido de <i>downlink</i> .....	53
<b>Figura 14</b> – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra óptica no sentido de <i>downlink</i> .....	54
<b>Figura 15</b> – Espectro óptico após o <i>splitter</i> 1x3 no sentido de <i>downlink</i> .....	55
<b>Figura 16</b> – Espectro óptico após o pré-amplificador no sentido de <i>downlink</i> .....	56
<b>Figura 17</b> – Espectro elétrico após o APD centrado em 1250 nm .....	57
<b>Figura 18</b> – Espectro elétrico após o primeiro <i>splitter</i> 1x2 no sentido de <i>downlink</i> . ....	58
<b>Figura 19</b> – Espectro elétrico após o segundo <i>splitter</i> 1x2 no sentido de <i>downlink</i> .....	58
<b>Figura 20</b> – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz no sentido de <i>downlink</i> .....	59
<b>Figura 21</b> – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz no sentido de <i>downlink</i> .....	59
<b>Figura 22</b> – Diagrama de olho: primeiro <i>smart meter</i> no sentido de <i>downlink</i> .....	61

<b>Figura 23</b> – Diagrama de olho: segundo <i>smart meter</i> no sentido de <i>downlink</i> .....	61
<b>Figura 24</b> – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1250 nm no sentido de <i>downlink</i> .....	62
<b>Figura 25</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1270 nm no sentido de <i>downlink</i> .....	62
<b>Figura 26</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1290 nm no sentido de <i>downlink</i> .....	63
<b>Figura 27</b> – Diagrama de olho: primeiro <i>smart meter</i> com ajuste de potência - <i>downlink</i> .....	65
<b>Figura 28</b> – Diagrama de olho: segundo <i>smart meter</i> com ajuste de potência - <i>downlink</i> .....	65
<b>Figura 29</b> – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1250 nm, com ajuste de potência - <i>downlink</i> .....	66
<b>Figura 30</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1270 nm, com ajuste de potência - <i>downlink</i> .....	66
<b>Figura 31</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1290 nm, com ajuste de potência - <i>downlink</i> .....	67
<b>Figura 32</b> – Espectro óptico após a combinação das subportadoras de RF no sentido de <i>uplink</i> .....	69
<b>Figura 33</b> – Espectro óptico após o combinador de potência 3x1 no sentido de <i>uplink</i> .....	69
<b>Figura 34</b> – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra óptica no sentido de <i>uplink</i> .....	70
<b>Figura 35</b> – Espectro óptico após o <i>splitter</i> 1x3 no sentido de <i>uplink</i> .....	71
<b>Figura 36</b> – Espectro óptico após o pré-amplificador no sentido de <i>uplink</i> .....	71
<b>Figura 37</b> – Espectro elétrico após o APD centrado em 1310 nm .....	72
<b>Figura 38</b> – Espectro elétrico após o primeiro <i>splitter</i> 1x2 no sentido de <i>uplink</i> .....	73
<b>Figura 39</b> – Espectro elétrico após o segundo <i>splitter</i> 1x2 no sentido de <i>uplink</i> ....	73
<b>Figura 40</b> – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz no sentido de <i>uplink</i> .....	74
<b>Figura 41</b> – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz no sentido de <i>uplink</i> .....	74
<b>Figura 42</b> – Diagrama de olho: primeiro <i>smart meter</i> no sentido de <i>uplink</i> .....	75
<b>Figura 43</b> – Diagrama de olho: segundo <i>smart meter</i> no sentido de <i>uplink</i> .....	76

<b>Figura 44</b> – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1310 nm - <i>uplink</i> .....	76
<b>Figura 45</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1330 nm - <i>uplink</i> .....	77
<b>Figura 46</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1530 nm - <i>uplink</i> .....	77
<b>Figura 47</b> – Diagrama de olho: primeiro <i>smart meter</i> com ajuste de potência - <i>uplink</i> .....	78
<b>Figura 48</b> – Diagrama de olho: segundo <i>smart meter</i> com ajuste de potência - <i>uplink</i> .....	79
<b>Figura 49</b> – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1310 nm, com ajuste de potência - <i>uplink</i> .....	79
<b>Figura 50</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1330 nm, com ajuste de potência - <i>uplink</i> .....	80
<b>Figura 51</b> – Diagrama de olho: portadora óptica em 1350 nm, com ajuste de potência - <i>uplink</i> .....	80



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Perdas de inserção de cada dispositivo óptico .....	47
<b>Tabela 2</b> – BER e Fator Q para a multiplexação por divisão no tempo dos <i>smart meters</i> .....	52
<b>Tabela 3</b> – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados: <i>downlink</i> .....	64
<b>Tabela 4</b> – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados com ajuste de potência: <i>downlink</i> .....	68
<b>Tabela 5</b> – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados: <i>uplink</i> .....	78
<b>Tabela 6</b> – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados com ajuste de potência: <i>uplink</i> .....	81



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMI	Advanced Measurement Infrastructure
AMM	Advanced Meter Management
APD	Avalanche Photodiode
A-RoF	Analog-Radio-over-fiber
BER	Bit Error Rate
CPRI	Common Public Radio Interface
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DML	Directly Modulated Laser
FDM	Frequency Division Multiplexing
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Curb
FTTCab	Fiber to the Cabinet
FTTH	Fiber to the Home
FTTx	Fiber-to-the-x
HAN	Home Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
MAC	Media Access Control
MDM	Meter Data Management
MR-FSK	Multi-Regional Frequency Shift Keying
MZ	Mach-Zehnder
NAN	Neighborhood Area Network

OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Units
PHY	Physical Layer
PLC	Power Line Communication
PON	Passive Optical Network
PRBS	Pseudo-Random Bit Sequence
RF	Radiofrequency
ROF	Radio-over-fiber
SNR	Relação sinal-ruído
SSMF	Single-Mode Optical Fiber
TDM	Time Division Multiplexing
TWDM-PON	Time and Wavelength Division Multiplexing PON
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
1.1	Integração entre IoT e <i>smart grids</i> .....	27
1.2	Medição Inteligente .....	28
1.3	Redes Ópticas Passivas .....	30
1.4	Rádio-sobre-fibra analógico (ROF ou <i>Radio-over-fiber</i> ).....	33
<b>2</b>	<b>OBJETIVO DO TRABALHO E METODOLOGIA .....</b>	<b>35</b>
2.1	Objetivo do Trabalho.....	35
2.2	Metodologia .....	35
<b>3</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>37</b>
3.1	Transmissão das informações dos <i>smart meters</i> através da Rede PON utilizando a técnica de multiplexação A-RoF.....	38
3.2	Multiplexação por Divisão no Tempo das informações dos <i>smart meters</i>	42
3.3	Balanco de potência da Rede PON proposta para a transmissão nos sentidos de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> .....	46
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
4.1	Multiplexação TDM dos dados de dois <i>smart meters</i> .....	50
4.2	Propagação no sentido de <i>downlink</i> .....	52
4.3	Propagação no sentido de <i>uplink</i> .....	68
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>85</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As redes de telecomunicações modernas de alta capacidade baseadas na tecnologia de fibra óptica são parte integrante e indispensável da sociedade (KEISER, 2014). Para chegar na eficiência de transmissão de dados que temos hoje, com a utilização da fibra óptica, foram diversos anos de estudos e dedicação por parte de Charles Kao, um dos pioneiros nas pesquisas de fibras ópticas de baixas perdas. Uma das aplicações das fibras ópticas atualmente é a sua utilização nas redes ópticas passivas (PON - do inglês *Passive Optical Network*). As redes PON são redes de acesso ópticas que não exigem quaisquer componentes ativos entre as instalações da prestadora de serviço e do cliente. Estas redes oferecem uma série de vantagens de funcionamento, dentre as quais podemos citar a larga banda passante, a baixa perda de propagação, a imunidade à interferência eletromagnética e o baixo custo de instalação, fator este que potencializa a sua cobertura e também o acesso aos serviços de dados (KEISER, 2014).

Nos últimos anos, de acordo com os avanços da tecnologia, um conceito que está cada vez mais ganhando espaço é o da Internet das Coisas (IoT do inglês *Internet of Things*). A Internet das Coisas refere-se à integração de objetos físicos e virtuais em redes conectadas à Internet, permitindo que “coisas” colem, troquem e armazenem uma enorme quantidade de dados numa nuvem, em que uma vez processados e analisados esses dados, gerem informações e serviços em escala inimaginável (ALMEIDA, 2015).

Atualmente as *smart grids* estão em processo de pesquisa e desenvolvimento em diversos lugares do mundo. Com o surgimento das *smart grids*, diversas tecnologias são estudadas para trabalharem em conjunto, devido ao fato de as mesmas necessitarem de um sistema de medição inteligente, gestão do consumo de energia, automação da rede, além de um moderno sistema de comunicação. Diante desses novos cenários, a IoT desempenha um papel importantíssimo na evolução das *smart grids*, onde cada dispositivo que faz parte da rede será considerado como um dispositivo IoT, apto a comunicar-se através da rede de dados *wireless* de forma autônoma, ou seja, sem que seja necessária a intervenção humana.

Devido à importância das redes elétricas na vida cotidiana, os clientes que utilizarão os serviços das *smart grids* esperam um sistema sem falhas, e caso ocorra algum problema, que seja resolvido o mais rápido possível. Com isso, um dos

requisitos para o bom funcionamento das *smart grids* é um sistema de comunicação de baixas perdas, de longo alcance, de baixo ruído, que suporte altas taxas de dados e que seja confiável e seguro, devido à grande quantidade de dispositivos IoT que serão conectados à rede, cujo tráfego, ainda imprevisível, será agregado ao dos usuários de dados das redes *wireless*. Dentre as tecnologias de guias de onda disponíveis, a única com capacidade comprovada de atender a demanda agregada em questão (dispositivos IoT e demais usuários das redes *wireless*) é a fibra óptica, ou, no contexto das redes de acesso, as redes ópticas passivas (PON), mais especificamente em sua nova geração, as redes ópticas TWDM-PON.

De acordo com (CHEN, 2011) um dos principais cenários de aplicação da IoT é nas *smart grids*, sendo sua aplicabilidade voltada para a medição automática dos medidores inteligentes. Nesta pesquisa é proposta uma arquitetura de comunicação na qual as informações coletadas pelos *smart meters* são transmitidas através da comunicação sobre a rede elétrica (PLC ou *Power Line Communication*) e encaminhadas até estação responsável pelo tratamento dos dados, através de uma rede PON. No entanto, as redes PLC são altamente ruidosas, de baixo alcance e de banda passante restrita, o que reduz o seu apelo para aplicações de alta densidade de tráfego como o IoT.

Para (OU, 2012) a prevenção e redução do impacto de desastres sobre a linha de transmissão de energia é um dos campos de aplicação mais importantes da IoT, onde as tecnologias avançadas de sensoriamento e comunicação podem evitar ou reduzir os danos causados por desastres naturais às linhas de transmissão. Neste trabalho é proposto um sistema de monitoramento *on-line* da linha de transmissão de energia. Além disto, o *ZigBee* é mencionado como opção de tecnologia de curto alcance para ser utilizada nas *smart grids*. Já para distâncias maiores é sugerido o emprego da rede pública de comunicação móvel 2G/3G/4G (via interface rádio CPRI), comunicação através da rede elétrica (PLC), entre outras. A característica marcante da interface CPRI é o emprego da multiplexação digital, que conduz ao consumo excessivo de banda passante para o atendimento de um número significativo de usuários *wireless*.

Em (BIKMETOV, 2017) é indicado que a IoT pode ser aplicada em diferentes áreas na infraestrutura de uma *smart grid*: medição inteligente e o sensoriamento de diferentes parâmetros operacionais das redes de geração, transmissão e distribuição de energia. Além disto, os autores apresentam uma topologia para uma

Infraestrutura Avançada de Medição (AMI), onde as informações provenientes dos *smart meters* são enviadas até um concentrador de dados (sem especificar a tecnologia de comunicação utilizada). Posteriormente, os dados de diversos concentradores são combinados e enviados até a concessionária por conexões de fibra óptica. Por conseguinte, a proposta em questão não contempla uma solução exclusiva para implementação de IoT em *smart grids*.

De acordo com (GHASEMPOUR, 2019) uma das aplicações mais importantes da IoT é nas *smart grids*, nas redes de geração, transmissão e distribuição de energia. Neste trabalho são apresentadas definições referentes à IoT e às *smart grids*, além de abordar conceitos sobre AMI. As tecnologias de comunicação sugeridas para a Rede de Área Doméstica (HAN do inglês *Home Area Network*) são: *ZigBee*, IEEE 802.11b, IEEE 802.11s e PLC. Para a Rede de Área de Vizinhança (NAN ou *Neighborhood Area Network*) são indicados os padrões IEEE 802.11, terceira e quarta geração de redes celulares, WiMax e redes ópticas (por exemplo, redes ópticas passivas). Para a Rede de Área Ampla (WAN ou *Wide Area Network*) são necessárias tecnologias de comunicação de longo alcance e alta largura de banda como fibra óptica e WiMax. Logo, trata-se de uma rede mais estratificada (maior número de camadas) e, portanto, mais complexa (requer maior capacidade de gestão de tráfego entre as diversas camadas)

De acordo com (MOLLAH, 2019) o número de dispositivos IoT conectados à *internet* chegará a 50 bilhões em 2020. Neste trabalho são abordados os principais requisitos de comunicação dos dispositivos IoT, assim como as tecnologias *wireless* capazes de atender as especificações desejadas para este cenário. Além disto, devido à conectividade em grande escala dos dispositivos IoT, é necessário desenvolver técnicas de segurança de dados, especialmente para esse tipo de aplicação. Também é mencionado que, devido ao crescimento contínuo da quantidade de dados geradas na IoT, será necessária a utilização de novas redes que atendam ao tráfego agregado de todos esses dispositivos de maneira eficiente, o que implica no desenvolvimento e aprimoramento de técnicas avançadas de modulação e multiplexação.

Em (BERGER, 2015) é proposto um sistema de comunicação para *smart meters* utilizando redes ópticas passivas juntamente com comunicação via PLC. Nesse sistema a PLC é implementada entre a residência do cliente e a OLT e está sujeita à interferência e ruídos, devido aos diversos dispositivos que são conectados

à rede elétrica, além de apresentar banda passante limitada. Apesar das limitações da PLC, este sistema proposto mostra que as redes PON podem ser conectadas a outras redes cabeadas ou sem fio, como será apresentado neste trabalho.

Em (ANDREADOU, 2016) são citadas as principais tecnologias de comunicação aptas a atender os requisitos das *smart grids*, sendo elas: PLC, Zigbee, WiMAX, 4G, fibra óptica, entre outras. Além disto, menciona-se alguns dos projetos de implementação de medição inteligente em diversos países da Europa, sendo que diferentes tecnologias de comunicação são utilizadas, onde a escolha é feita de acordo com os objetivos específicos de cada projeto.

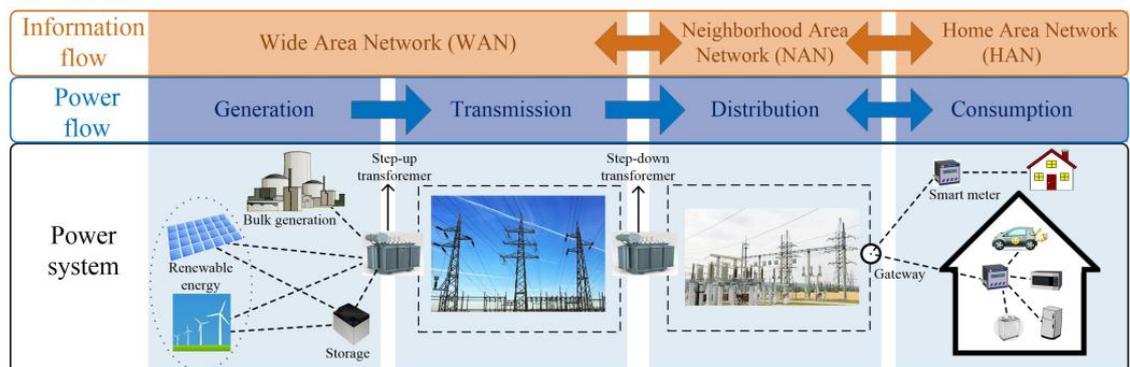
Em (JOHANN, 2019) foi proposta uma topologia de rede óptica passiva, baseada na nova geração TWDM-PON, para atender a demanda agregada de tráfego de dados das futuras redes *wireless* 5G, através da técnica de multiplexação A-RoF (do inglês Analog-Radio-over-fiber).

### 1.1 Integração entre IoT e *smart grids*

Nos últimos anos, a tecnologia IoT ganhou grande atenção em várias aplicações e permitiu a interconexão de vários dispositivos da rede utilizados na vida cotidiana através da *internet*. A IoT é definida como uma rede que pode conectar qualquer objeto à *internet* com base em um protocolo para troca de informações e comunicação entre vários dispositivos inteligentes, o protocolo *IP*.

A *smart grid*, considerada uma das maiores aplicações da IoT, é composta por três tipos de redes, uma HAN, uma NAN e uma WAN (SALEEM, 2019), mostradas na Figura 1.

Figura 1. Arquitetura da *smart grid* apresentando sistemas de potência, fluxo de potência e fluxo de informação



Fonte: (SALEEM, 2019)

HAN é a primeira camada: ela gerencia os requisitos de energia dos consumidores sob demanda e consiste em dispositivos inteligentes como eletrodomésticos (incluindo máquinas de lavar, televisores, condicionadores de ar, refrigeradores e fornos), veículos elétricos, bem como fontes de energia renováveis (por exemplo, painéis solares). As tecnologias de comunicação preferidas para as HANs são de baixo alcance, como as comunicações sobre a linha de energia (tecnologia com fio via PLC), *ZigBee*, *Bluetooth* e *wifi* (tecnologias sem fio) (SALEEM, 2019).

A NAN, também conhecida como Rede de Área de Campo (FAN), é a segunda camada de uma *smart grid* e consiste em um conjunto de medidores inteligentes pertencentes a várias HANs. Ela coleta as informações de serviço e medição de várias HANs e as transmite aos pontos coletores de dados que conectam diversas NANs à uma WAN. A WAN é a terceira camada de uma *smart grid* e serve como um *backbone* para comunicação entre *gateways* de rede ou pontos de agregação (SALEEM, 2019).

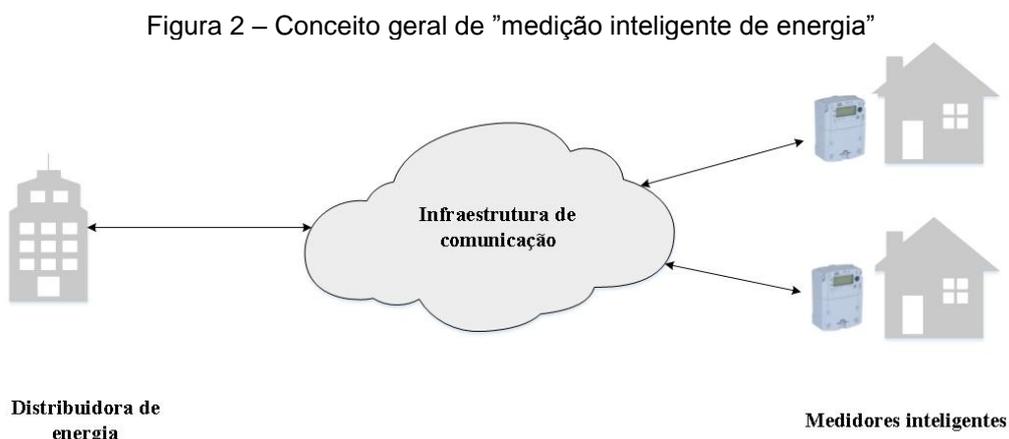
Uma das principais tecnologias para implantar o acesso à comunicação com largura de banda elevada é a fibra óptica, que, embora cara para instalar, é, sem dúvida, a tecnologia mais sofisticada, capaz de suportar as maiores larguras de banda (BERGER, 2015).

As empresas de energia elétrica requerem alto grau de visibilidade, disponibilidade e controle da rede de distribuição, visto que a coleta de dados e a análise em tempo real tornaram-se a parte mais fundamental de seu modelo de negócio. As redes de fibras ópticas desempenham papel essencial no suporte aos requisitos de troca de informações entre os clientes, a rede de distribuição e o centro de dados, onde é realizada a análise destes dados em tempo real. O volume agregado de dados dificilmente será suportado sem a infraestrutura de fibra óptica em algumas partes da rede de distribuição (BERGER, 2015), especialmente se considerarmos que os dados agregados nos *backbones* compreenderão os demais dispositivos IoT e os clientes convencionais de dados das redes *wireless*.

## 1.2 Medição Inteligente

Medição inteligente de energia significa “automação de medição de consumo eliminando qualquer intervenção humana no processo de leitura dos medidores”.

Este novo processo pressupõe a substituição dos medidores convencionais por medidores eletrônicos que são acessados pelos sistemas de faturamento da distribuidora através de uma plataforma de comunicação conforme ilustrado na Figura 2 (SCHRODER FILHO, 2017).



Fonte: Adaptado de (SCHRODER FILHO, 2017).

O sistema de medição inteligente de energia é apenas um dos diversos sistemas que integram o conceito de *smart grids*. Entretanto, usualmente, o sistema de medição inteligente aparece com grande destaque nos projetos de redes elétricas inteligentes em decorrência de alguns fatores que impactam, de forma mais intensa, as operações das concessionárias, tanto no tocante a benefícios quanto a custos agregados. Desses fatores, é possível citar (TOLEDO, 2012):

- Para a concessionária, os medidores de energia tem como função principal a consolidação das informações para faturamento. Portanto, toda a remuneração do setor elétrico é baseada nas informações provenientes desses medidores. Independentemente de outras funções avançadas adicionais, sua função principal sempre será a de gerar dados para faturamento;
- Os medidores de energia representam a fronteira entre a rede elétrica da concessionária e a unidade consumidora. Assim, os medidores inteligentes podem servir como canal de interação entre a distribuidora e seus clientes;
- Como cada unidade consumidora possui um medidor de energia, investimentos na modernização destes equipamentos são expressivos em relação a outros componentes da rede elétrica. Por conseguinte, qualquer custo adicional referente aos medidores inteligentes, terá um impacto em escala sobre o custo de fornecimento de energia elétrica.

Um componente fundamental nas *smart grids* é a infraestrutura avançada de medição - AMI. A AMI forma a rede de comunicação para a transferência de dados entre os *smart meters* até a distribuidora de energia, onde há um agregador de dados que concentra as informações recebidas de todos os medidores. Além disso, outros componentes também são de extrema importância no processo de medição avançada.

O *gerenciamento avançado do medidor* (AMM ou *Advanced Meter Management*) refere-se a uma plataforma técnica de gerenciamento para medidores inteligentes dispostos em redes de comunicação, lendo perfis de carga em intervalos de tempo inferiores a uma hora. Pode ser entendido como toda ação de gerenciamento sobre o medidor ativo da rede.

A AMM não armazena os dados coletados dos medidores, mas transmite-os ao gerenciamento de dados do medidor (MDM ou *Meter Data Management*) (CGEE, 2012). O MDM processa e gerencia os dados gerados pelos medidores. Tem como funções básicas atuar como repositório de dados de registros, eventos e alarmes, e processar e analisar dados dos medidores, aplicando validação e retificação em dados inconsistentes e transformando perfis de carga elementares em informação útil à concessionária (CGEE, 2012).

### 1.3 Redes Ópticas Passivas

A rede óptica passiva (PON) é baseada no uso de multiplexação por divisão ampla de comprimentos de onda (CWDM - do inglês *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) e transmissão bidirecional em uma única fibra óptica. Em uma PON, não há componentes ativos entre o escritório central e as instalações do cliente (KEISER, 2014).

A aplicação da tecnologia PON para fornecer conectividade de banda larga na rede de acesso às residências, unidades de várias ocupações e pequenas empresas geralmente é chamada fibra para x (FTTx ou *fiber-to-the-x*). Aqui, x é uma letra que indica o quão próximo a extremidade da fibra está para o usuário real (KEISER, 2014):

- Fibra até a residência (FTTH ou *Fiber to the Home*)
- Fibra até o prédio (FTTB ou *Fiber to the Building*)

- Fibra até o guia (cabo coaxial ou par trançado) (FTTC ou *Fiber to the Curb*)
- Fibra até o armário (FTTCab ou *Fiber to the Cabinet*)

Os principais componentes que fazem parte de uma PON são:

**Terminal de linha óptica (OLT ou *Optical Line Terminal*)** - Está localizado em um escritório central e controla o fluxo bidirecional de informações através da rede. Um OLT deve conseguir suportar distâncias de transmissão de até 20 km. Na direção do fluxo (*downlink*), a função de um OLT é transmitir o tráfego de voz, dados e vídeo de uma rede de longa distância ou metropolitana a todos os usuários da PON. No sentido inverso (*uplink*), um OLT recebe e distribui vários tipos de tráfego de voz e dados dos usuários da rede (KEISER, 2014).

**Terminal de rede óptica (ONT ou *Optical Network Terminal*)** - Situa-se diretamente nas instalações do cliente. O objetivo é proporcionar uma conexão óptica com a PON e fazer a interface elétrica para o equipamento local do cliente (KEISER, 2014).

**Unidade de rede óptica (ONU ou *Optical Network Unit*)** - Embora seja semelhante à ONT, normalmente está alojada em um abrigo de equipamentos exterior, perto das instalações do usuário. Essas instalações podem incluir abrigos fixados a postes de concessionárias de energia ou em um local centralizado dentro de um parque de escritórios (KEISER, 2014).

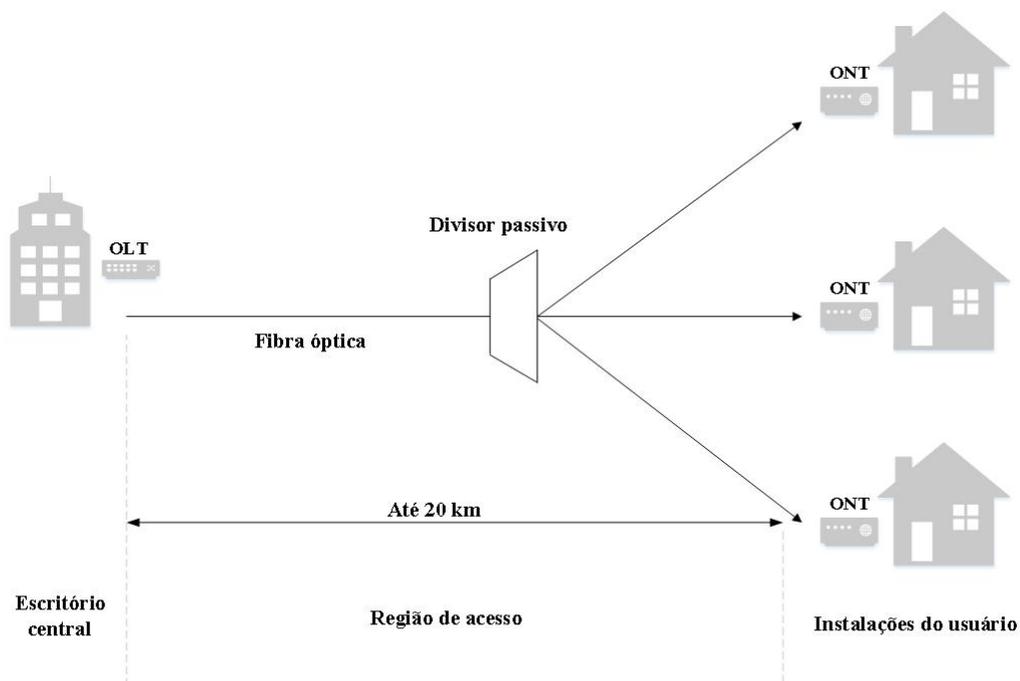
Ou seja, a ONT e a ONU possuem a mesma função: quando está localizada em distâncias próximas do cliente se encaixa nas configurações FTTH e FTTB e recebe a nomenclatura de ONT; já no caso de não estar tão próximo do usuário final são definidas pelas configurações FTTC e FTTCab e são chamadas de ONU.

**Splitter** - É um dispositivo passivo capaz de combinar e dividir o sinal óptico. Em sentido *downstream* este dispositivo irá dividir o sinal de entrada e o direciona para todas as portas de saída que estão ligadas com as ONTs /ONUs. No sentido *upstream* este dispositivo combina todos os sinais enviados desde as ONTs /ONUs em direção ao OLT. Cada ONT/ONU estabelece comunicação direta com o OLT, mas não com as outras ONTs/ONUs (FERREIRA, 2011).

A Figura 3 ilustra a arquitetura de uma PON típica, na qual uma rede de fibra óptica conecta equipamentos de comutação em um escritório central com um número de assinantes do serviço. No escritório central, dados e voz digitalizados são combinados e enviados para os clientes no fluxo (*downstream*) ao longo de uma

ligação óptica, utilizando um comprimento de onda de 1490 nm, e dados de vídeo são encaminhados através do comprimento de onda de 1550 nm. O caminho de retorno no contrafluxo (cliente para o escritório central ou *upstream*) para os dados e voz utiliza o comprimento de onda de 1310 nm (KEISER, 2014). A tecnologia atual para as redes ópticas passivas é a GPON, a qual oferece velocidades de transmissão dos dados no sentido de *downstream* de 2,5 Gbps e velocidades no sentido de *upstream* de 1,25 Gbps.

Figura 3 - Arquitetura de uma típica rede óptica passiva



Fonte: adaptado de (KEISER, 2014).

Conectadas em uma de suas extremidades ao escritório central, uma fibra óptica monomodo estabelece a conexão com um divisor passivo de potência óptica, localizado perto de um complexo habitacional ou localização do usuário. Nesse ponto, o divisor passivo simplesmente divide a potência óptica incidente em N parcelas idênticas, a serem encaminhadas aos diversos assinantes. O número de caminhos de separação pode variar de 2 a 128, mas, em uma PON, eles tipicamente são 32, 64 ou 128. A partir do divisor óptico passivo, fibras monomodo individuais transmitem o sinal às instalações dos usuários. A distância de transmissão de fibra óptica do escritório central ao usuário pode ser de, no máximo, 20 km. Assim, os

dispositivos ativos só existem no escritório central e nas instalações do usuário (KEISER, 2014).

A principal vantagem desse tipo de arquitetura é que, historicamente, ela tem sido de forma significativa mais barata que outras opções de redes de acesso, requerendo fontes de baixa potência e uma menor quantidade de guias de onda, reduzindo o custo de instalação e as despesas operacionais para os provedores de serviços (BERGER, 2015). Convém destacar ainda que os custos de instalação da rede são rateados entre todos os usuários, o que reduz o custo pelo uso do serviço e permite uma maior cobertura de comunicação.

Através da utilização de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM ou *Wavelength Division Multiplexing*), é possível aumentar significativamente a capacidade da rede. Na arquitetura PON WDM, um multiplexador de comprimento de onda, normalmente uma grade de guia de onda (AWG ou *Arrayed Waveguide Grating*), é usado no lugar do divisor de potência. A sua flexibilidade de oferta de serviço é a vantagem principal de uma PON WDM em comparação com outros tipos de PON. Como cada usuário tem um comprimento de onda específico que não é compartilhado com os outros e um cliente com demanda de largura de banda muito elevada pode ser facilmente acomodado sem afetar outros clientes com menores demandas (KEISER, 2014).

Seguindo esta tendência, a evolução tecnológica deu origem à nova geração da rede PON WDM chamada *TWDM-PON* (*Time and Wavelength Division Multiplexing PON* ou PON com multiplexação no tempo e em comprimentos de onda), atualmente capaz de oferecer taxas bidirecionais de 10 Gbps a cada usuário, taxa que pode alcançar 40 Gbps no curto prazo, com o desenvolvimento da tecnologia. Esta nova geração de rede passiva tem capacidade de dar suporte ao tráfego agregado dos dispositivos IoT a compor as *smart grids*, em especial os *smart meters*, sem prejuízo à qualidade de comunicação de dados dos demais usuários da rede *wireless* e também da rede PON.

#### **1.4 Rádio-sobre-fibra analógico (ROF ou *Radio-over-fiber*)**

Segundo (ZHANG, 2017) a modulação analógica de uma subportadora de RF (radiofrequência) sobre uma portadora óptica (ROF ou *Radio-over-fiber*) é uma

técnica promissora para atender as altas taxas agregadas de dados do novo padrão 5G.

Os avanços propostos para atingir os requisitos da nova geração de redes móveis mostram uma tendência no uso da fibra óptica como meio de transmissão. Nota-se que a fibra está presente desde redes *backbone* com transmissões intercontinentais até redes de acesso local fixo *FTTH*, fazendo-a ideal para atingir uma convergência de serviços (OSORIO ROMERO, 2018).

Com base nisso, a tecnologia de ROF tem sido considerada uma possível solução para a distribuição de sinais de alta capacidade e alta frequência, por poder transportar grandes volumes de dados agregados, característica esperada com o advento das novas aplicações baseadas no padrão *wireless* 5G e também dos dispositivos IoT. Essa técnica consiste na transmissão de sinais de rádio por uma fibra óptica, em que o sinal de rádio modula uma portadora óptica (OSORIO ROMERO, 2018). Por conseguinte e considerando-se apenas o domínio da frequência, o resultado são diversas subportadoras multiplexadas em frequência que servem de sinal modulante para a portadora óptica, aumentando a capacidade de transmissão de dados e, em função disto, o aproveitamento da banda passante disponível no canal óptico. Esta técnica de multiplexação foi empregada por (JOHANN, 2019) que demonstrou a economia de banda-passante quando comparada à multiplexação digital utilizada nas interfaces CPRI (*Common Public Radio Interface* ou Interface Rádio Pública Comum) do padrão de transmissão de sinais *wireless* 4G e em adaptação para o padrão 5G.

## 2 OBJETIVO DO TRABALHO E METODOLOGIA

### 2.1 Objetivo do Trabalho

Uma das aplicações da IoT é nas *smart grids*. Para que o fluxo bidirecional de informações originado nos diversos sensores da rede de energia funcione de forma adequada, é necessário um sistema de comunicação que suporte o volume de dados agregados, a ser viabilizado pelo emprego de técnicas de modulação e multiplexação com desempenho satisfatório.

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma topologia de comunicação baseada no novo padrão de redes ópticas passivas (PON) de acesso chamado *TWDM-PON*, que emprega a multiplexação analógica da portadora óptica por subportadoras de RF, como nos sistemas ROF, com o intuito de economizar banda passante para a multiplexação dos dados dos diversos usuários *wireless*, sejam eles clientes 3G, 4G ou 5G. Em função disto, a topologia proposta é capaz de dar suporte ao tráfego agregado dos diversos dispositivos IoT a compor as *smart grids*, em especial os *smart meters*, sem prejuízo à qualidade de comunicação de dados dos demais usuários da rede *wireless* e também da rede PON.

### 2.2 Metodologia

A metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho foi a seguinte:

1. Revisão bibliográfica sobre os principais conceitos envolvidos no desenvolvimento do trabalho;
2. Projeto da topologia proposta de acordo com as teorias estudadas, assim como em conformidade com os dispositivos habitualmente utilizados para projetos de redes ópticas, especialmente as redes passivas;
3. Desenvolvimento e simulação do sistema de comunicação proposto para levar as informações coletadas pelos *smart meters* até a concessionária de energia através do emprego do *software OptiSystem*, em sua versão gratuita do ano de 2016, *software* específico para testes e simulações de projetos de enlaces ópticos;

4. Análises dos resultados de simulação e, caso necessário, realização de ajustes nos parâmetros do sistema para aperfeiçoamento da topologia proposta, retornando ao passo 2;
5. Registro dos resultados, elaboração do trabalho de conclusão de curso e das publicações cabíveis.

### 3 APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA PROPOSTA

Antes da etapa de simulação, foi necessário descobrir a taxa de dados utilizada por um *smart meter*. Com essa informação é possível estimar quantos medidores de energia poderão enviar seus dados através de um canal *wireless* 5G, conhecida a taxa de dados de cada canal *wireless*.

Existem diferentes modelos de *smart meters* no mercado, porém todos possuem em comum a função de medição dos dados de consumo de energia. O *smart meter* estudado foi referente a linha de medidores inteligentes de energia SMW da WEG, desenvolvida e fabricada no Brasil para aplicações em redes inteligentes, sendo que o mesmo possibilita a instalação de um acessório de comunicação acoplado ao medidor (WEG, 2019). De acordo com o manual de informações técnicas, o módulo de comunicação apresenta dois meios físicos para a comunicação dos medidores de energia: um via radiofrequência (RF) e outro via rede elétrica (PLC).

Alguns dos dados informados para a comunicação via RF são:

- Padrão: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) 802.15.4g;
- Faixa de frequência: 902 a 907.5 MHz e 915 a 928 MHz;
- Modulação MR-FSK;
- Taxa de dados: até 75 kbps.

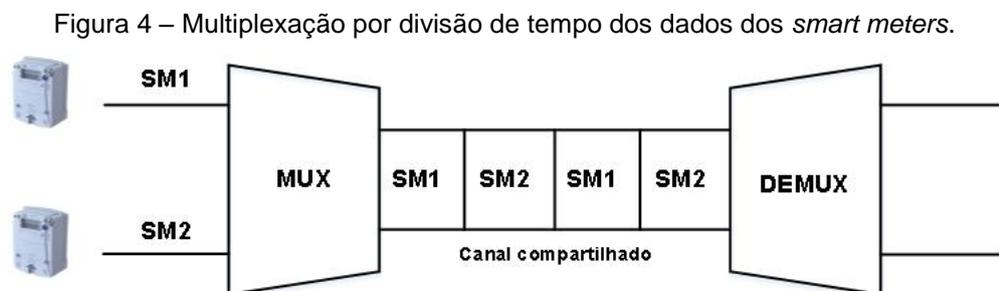
O IEEE 802.15.4 se concentra no desenvolvimento dos padrões para redes pessoais ou redes sem fio de curta distância, com foco na vida útil da bateria, mais do que na obtenção de altas taxas de transferência de dados (BERGER, 2015). Além disto, o IEEE 802.15.4g é complementar ao padrão IEEE 802.15.4, destinado à aplicações nas redes elétricas inteligentes, especialmente na conexão dos medidores de energia, especificando a camada de controle de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY).

A camada física transmite e recebe dados sem fios e pode operar em diferentes faixas de frequência, sendo que de acordo com a banda utilizada há uma especificação da taxa de dados, assim como a modulação a ser usada. Dessa forma, de acordo com as informações técnicas do medidor, verificou-se através do padrão IEEE 802.15.4g que a taxa de dados para a faixa de frequência de 902-928 MHz é de 50 kbps. Esta taxa também é a taxa de dados estimada para os

dispositivos IoT (SINHA, 2017), de forma geral, o que significa que a solução proposta considera o *smart meter* um dispositivo IoT, sendo portanto totalmente compatível com qualquer outro dispositivo que empregue esta tecnologia.

De acordo com os requisitos mínimos relacionados com o desempenho técnico das redes *wireless* 5G as taxas máximas de transmissão do canal são 20 Gbps para *downlink* e 10 Gbps para *uplink* (ITU-R, 2017). Diante disso, considerando-se um cenário em que a rede *wireless* 5G fosse dedicada exclusivamente para a transmissão de dados dos *smart meters*, sendo utilizado uma taxa de 50 kbps por medidor, cada canal *wireless* seria capaz de suportar a transmissão simultânea do tráfego de dados de 400.000 e 200.000 *smart meters* nas direções *downlink* e *uplink*, respectivamente.

Para a transmissão do tráfego agregado dos *smart meters* é utilizado a técnica de multiplexação por divisão no tempo (TDM ou *Time Division Multiplexing*), que permite a transmissão de vários sinais em um mesmo meio de transmissão, ou seja, cada medidor possuirá um intervalo de tempo específico para o envio de suas informações. A Figura 4 mostra a representação da multiplexação TDM para dois *smart meters*.



Fonte: Autor.

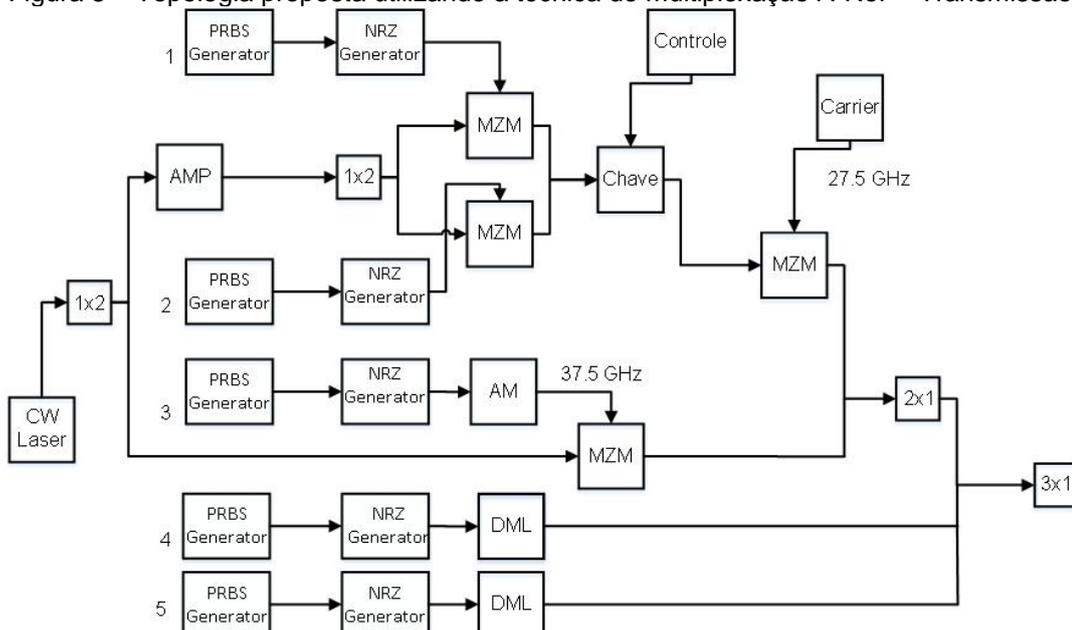
### 3.1 Transmissão das informações dos *smart meters* através da Rede PON utilizando a técnica de multiplexação A-RoF

Como mencionando anteriormente, a taxa de dados utilizada por um *smart meter* é de 50 kbps. No entanto, o *software* possui alguns parâmetros gerais que são muito importantes, pois afetam os requisitos de velocidade e precisão para uma simulação específica. Um desses parâmetros é a *taxa de dados global de simulação*, ou seja, há uma taxa de dados que é definida assim que se cria um novo *layout* e

que interfere nos resultados de simulação de todos os componentes do sistema sob teste. Além disto, há também a taxa específica do componente, por exemplo, a taxa de dados do componente PRBS (*Pseudo-Random Bit Sequence*). Ao fazer a conexão do sistema proposto para a multiplexação TDM dos dados dos *smart meters* com a topologia de rede PON proposta por (JOHANN, 2019), ocorreu um problema de simulação em função da utilização da taxa de 50 kbps: devido ao fato de se utilizar 1 Gbps como taxa de dados dos demais clientes da rede PON, a taxa de dados global de simulação deve ser um valor próximo ou maior que 1 Gbps. Quando se utilizou os 50 kbps referente às taxas dos *smart meters*, a simulação foi cancelada automaticamente pelo *software*, com um aviso de que estava interferindo nos parâmetros gerais do *layout*. Por conseguinte, para solucionar o problema optou-se pela utilização de todas as taxas geradas pelos componentes PRBS como sendo de 1 Gbps, o que representa a multiplexação TDM de 20.000 (vinte mil) *smart meters*. Apesar de se saber que a taxa de dados a ser adotada pelos *smart meters* enquanto dispositivos IoT é muito menor, de 50 kbps, entende-se que se a topologia proposta apresentar um bom desempenho com uma taxa maior, de 1 Gbps, deverá operar com desempenho semelhante quando forem utilizadas taxas menores.

A Figura 5 apresenta o sistema que foi desenvolvido no *software OptiSystem* para a transmissão das informações dos *smart meters* através da rede PON utilizando a técnica de multiplexação A-RoF.

Figura 5 – Topologia proposta utilizando a técnica de multiplexação A-RoF - Transmissão.



Fonte: o autor.

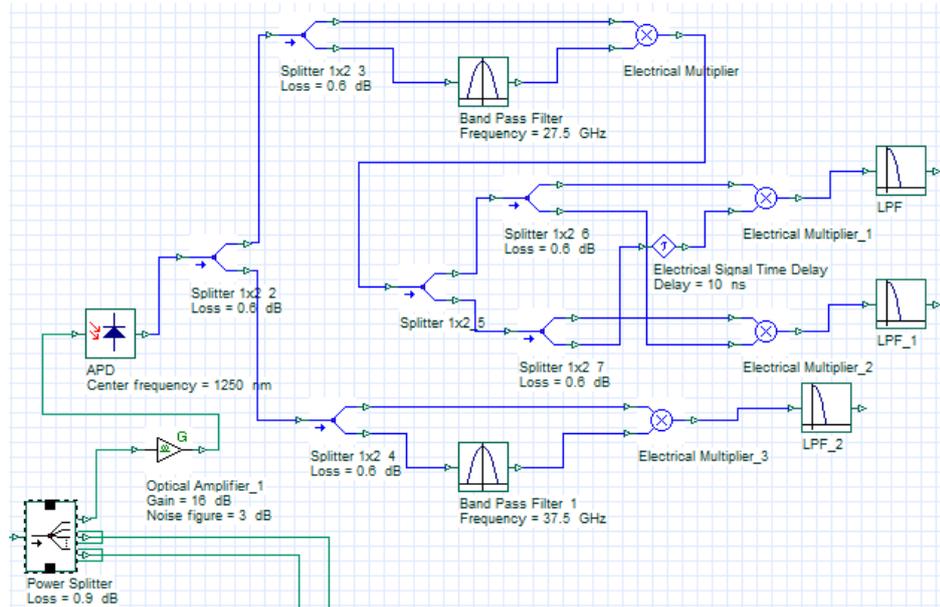
Na Figura 5 está demonstrado como os dados dos *smart meters* são acoplados no sistema proposto por (JOHANN, 2019). Nesta figura, os sinais PRBS 1 e 2 representam as informações dos medidores inteligentes, dados estes que agregados são transmitidos através da modulação da subportadora de 27,5 GHz; o canal 3 corresponde à subportadora de RF de 37,5 GHz, que representa um cliente da rede *wireless* 5G qualquer; e os canais 4 e 5 se referem às informações de dois clientes quaisquer da rede óptica passiva. No Apêndice A é possível verificar como o diagrama de blocos da Figura 5 foi simulado no *software OptiSystem*.

A partir de lasers monomodo foram geradas as portadoras ópticas em 1250 nm, 1270 nm e 1290 nm. O *CW Laser* representa a portadora óptica de 1250 nm, que passa por um *splitter* óptico 1x2 e uma de suas saídas é usada para modular a subportadora de RF de 37,5 GHz, enquanto a outra saída é amplificada (para compensar a perda de inserção dos elementos adicionais neste braço) e novamente dividida em dois sinais que são utilizados como portadoras ópticas para os moduladores eletro-ópticos *Mach-Zehnder* (MZ) referentes aos *smart meters*. O sinal de saída, após a multiplexação TDM dos dados dos medidores, é usado para modular um MZ com uma subportadora de RF de 27,5 GHz. Em seguida, os sinais modulados em 27,5 GHz e 37,5 GHz são acoplados através de um combinador óptico 2x1 e compõem a portadora óptica de 1250 nm.

Para a modulação das portadoras ópticas em 1270 nm e 1290 nm, utilizaram-se lasers de modulação direta (DML ou *Directly Modulated Laser*), técnica mais simples e barata quando comparada aos moduladores MZ (JOHANN, 2019). A seguir, as portadoras ópticas de 1250 nm, 1270 nm e 1290 nm são acopladas através de um combinador óptico 3x1 e transmitidas por meio de uma fibra óptica ao longo de 20 km.

A Figura 6 mostra a recuperação das informações que são enviadas a partir das subportadoras de RF de 27,5 GHz e 37,5 GHz. No Apêndice B está apresentado todo o sistema de recepção no sentido de *downlink*, em que é possível verificar a recuperação das portadoras ópticas de 1270 nm e 1290 nm.

Figura 6 – Topologia proposta utilizando a técnica de multiplexação A-RoF - Recepção.



Fonte: o autor.

Após o sinal percorrer a fibra ao longo de 20 km de extensão, é dividido em três sinais ópticos exatamente iguais por um *splitter* 1x3. Para a recuperação das informações transmitidas através das 3 portadoras ópticas, são utilizados 3 fotodetectores com comprimento de onda central correspondente ao que foi utilizado na transmissão de cada portadora. No caso das portadoras ópticas de 1270 nm e 1290 nm as informações são recuperadas logo após seus respectivos APDs, uma vez que a modulação foi feita de forma direta, em banda base.

Para o canal de 1250 nm foi necessário utilizar um pré-amplificador com ganho de 16 dB para aumentar o nível do sinal óptico antes da fotodetecção, pois o mesmo carrega as informações das subportadoras de RF e para a recuperação de cada uma dessas informações é necessário passar por diversos acopladores/*splitters* que atenuam a potência do sinal. Diante disso, após o APD de 1250 nm o sinal elétrico resultante é dividido em dois sinais exatamente iguais que são submetidos a outros dois *splitters*. O primeiro terminal de cada *splitter* é acoplado em uma das entradas do misturador elétrico, enquanto a segunda entrada é inserida em um filtro com frequência central correspondente à frequência da subportadora cuja informação deseja-se recuperar, ou seja, 27,5 GHz ou 37,5 GHz. Desta forma é realizada a demodulação das subportadoras de RF de modo que na saída do misturador tem-se um sinal elétrico que corresponde à diferença entre os

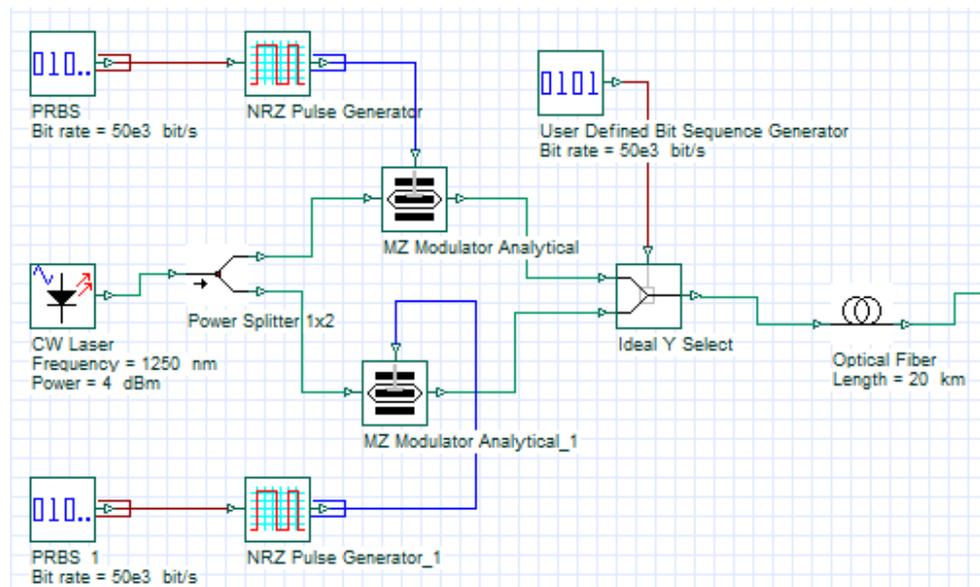
sinais em batimento, ou seja, a informação transmitida. Para o canal de 37,5 GHz, após o misturador é usado um filtro passa-baixa para eliminar as altas frequências que surgiram no processo de mistura dos sinais e obter somente a informação em banda base. No entanto, como as informações dos *smart meters* foram transportadas pela subportadora de 27,5 GHz sob multiplexação TDM, após o misturador há o processo de recuperação da multiplexação por divisão no tempo, onde o sinal resultante é dividido em dois sinais iguais e através do batimento cruzado dos mesmos e da compensação do atraso que distingue os dois sinais no domínio do tempo, obtém-se as informações de cada *smart meter*.

Os diagramas de olho obtidos estão mostrados na seção 4, referentes à análise dos resultados, assim como suas respectivas BER (*Bit Error Rate*) e Fator Q. A seguir, na seção 3.2 será apresentada a topologia proposta para realizar a multiplexação TDM dos dados dos *smart meters*.

### 3.2 Multiplexação por Divisão no Tempo das informações dos *smart meters*

A Figura 7 apresenta o sistema de transmissão que foi desenvolvido no *software OptiSystem* para a multiplexação TDM dos dados dos *smart meters*.

Figura 7 – Topologia proposta para multiplexação TDM dos dados - Transmissão.



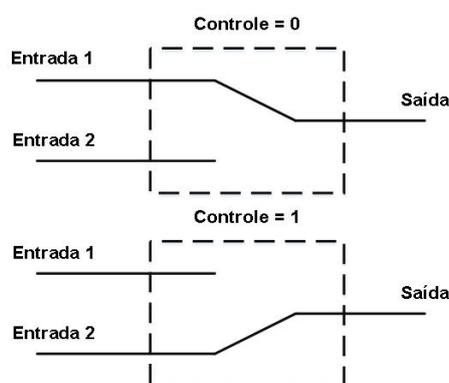
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através da Figura 7 é possível verificar que o *software OptiSystem* possui diferentes representações dos sinais, caracterizados por diferentes cores nas conexões entre os componentes, ou seja, as conexões em vermelho representam um sinal binário, as conexões em azul um sinal elétrico e as conexões em verde um sinal óptico.

Os componentes *PRBS* geram uma sequência aleatória de bits que representam as informações enviadas pelos *smart meters* com uma taxa de dados de 50 kbps. Os componentes *NRZ Pulse Generator* convertem a sequência de bits de entrada em sinais elétricos sem retorno ao zero. Esses sinais são usados como sinais modulantes para os moduladores *MZ*, que são responsáveis por realizar a conversão das informações do domínio elétrico para o domínio óptico. O *Laser CW* gera um sinal óptico no comprimento de onda de 1250 nm, sendo a saída da fonte óptica submetida a um *splitter*, responsável por dividir o sinal óptico de entrada em dois sinais de saída que são utilizados como portadoras ópticas para os moduladores *MZ*. O componente *Ideal Y Select* é uma chave óptica e é utilizada para fazer a multiplexação no tempo dos sinais em sua entrada. Esse elemento possui um sinal de controle dado pelo *User Defined Bit Sequence*, ou seja, é gerada uma sequência de bits que pode ser definida pelo usuário e que faz a comutação entre as entradas do sinal. Esta sequência de bits está associada à taxa de transmissão dos dados a serem multiplexados, sendo múltipla do *tempo de bit (bit slot)*. Através da Figura 8 é possível verificar o modo de operação da chave óptica:

- Se o sinal de controle for 0, o sinal óptico na entrada 1 passa para a saída;
- Se o sinal de controle for 1, o sinal óptico na entrada 2 passa para a saída.

Figura 8 – Funcionamento da chave óptica “Y Select”

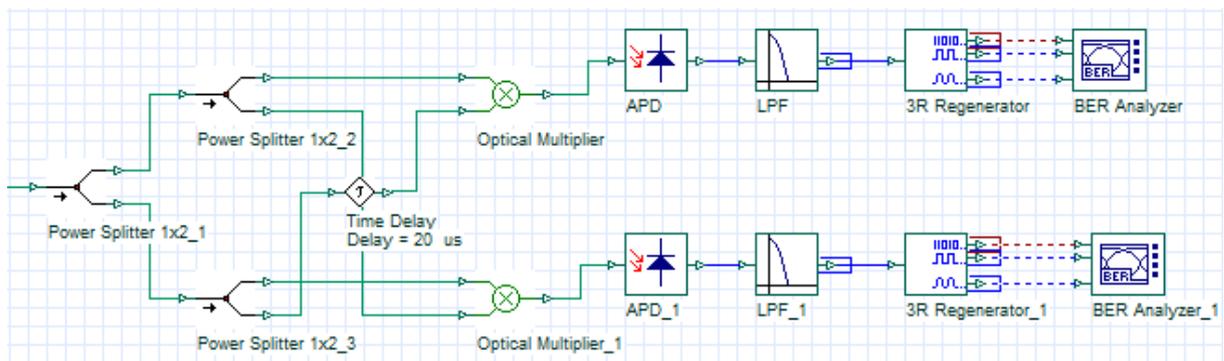


Fonte: Autor.

Dessa forma, ao ajustar a taxa do sinal de controle com a mesma taxa de dados enviada pelos *smart meters*, sabe-se que a cada 50 kbps ocorrerá a comutação entre as entradas. Após a combinação dos sinais, os mesmos são enviados ao longo de 20 km através de uma fibra óptica.

A Figura 9 mostra o sistema de recepção para a recuperação dos dados enviados pelos *smart meters*.

Figura 9 – Topologia proposta para demultiplexação dos dados - Recepção.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Depois de percorrer a fibra, o sinal é submetido a um *splitter* óptico, que irá separar o sinal de entrada em dois sinais de saída exatamente iguais. Como mostrado na Figura 4, os sinais compartilham o mesmo canal de comunicação, porém cada *smart meter* possui uma parcela de tempo para transmitir seus dados, em função da multiplexação TDM. Dessa forma, para a recuperação da informação, os dois sinais resultantes do primeiro *splitter* são acoplados em outros dois *splitters*. O primeiro terminal de cada *splitter* é conectado de forma direta, enquanto o segundo terminal é interligado de forma cruzada ao misturador. Isso faz com que na saída do misturador, dentre outros produtos de batimento, exista um produto correspondente à diferença dos sinais misturados. Deste modo, o resultado na saída do primeiro misturador é referente às informações transmitidas pelo primeiro *smart meter*, pois é feita a subtração do sinal com a compensação do atraso, o que representa os dados transmitidos pelo segundo *smart meter*. Processo semelhante ocorre para o segundo misturador, onde é feita a subtração das informações do primeiro *smart meter*.

No *software* há um componente com o mesmo princípio de funcionamento da chave óptica *Ideal Y Select*, que foi usado na multiplexação dos dados dos *smart*

*meters*, para ser utilizado no sentido contrário, ou seja, as informações em sua entrada passam para a saída de acordo com o sinal de controle. Dessa forma, ao utilizar o dispositivo com comportamento semelhante na recepção, ele estaria desfazendo o que foi feito anteriormente, ou seja, demultiplexando os dados dos *smart meters*. No entanto, foram realizados testes para verificar o seu funcionamento e os resultados obtidos não foram como o esperado. A chave óptica da recepção não realizou a comutação entre as portas de forma correta. Buscou-se a assistência técnica do desenvolvedor do *software*, mas em função de estar sendo empregada uma versão demonstrativa cuja licença de utilização tem validade restrita à 30 dias, a assistência técnica condicionou um auxílio mais aprofundado à compra do *software*. Diante disto, foi necessário utilizar o método de recuperação do sinal mencionado anteriormente, que emprega a compensação do atraso na recepção para recuperar os dados multiplexados no tempo.

Após a recuperação dos dados de cada medidor através do batimento cruzado dos sinais, a portadora óptica é detectada e o sinal óptico é transformado em sinal elétrico ao passar pelo fotodetector APD. Em seguida o sinal elétrico passa por um filtro passa baixa, com o intuito de eliminar o ruído em frequências mais altas, e por um regenerador do sinal *3R Regenerator*. A primeira porta de saída do regenerador é a sequência de bits transmitida originalmente, a segunda é o sinal NRZ e a última saída é uma cópia do sinal de sua entrada. Com isso, através do componente *BER Analyzer* é possível obter a taxa de erro de bit (BER), para cada *smart meter*, assim como o diagrama de olho e o Fator Q, parâmetros que podem ser utilizados para avaliar o sistema de comunicação de forma qualitativa, através do diagrama de olho, e quantitativa, através da BER.

Como está sendo utilizada a mesma taxa de dados para os dois *smart meters*, foram realizados testes para saber se a recuperação do sinal estava ocorrendo de forma correta. Como no final do sistema de comunicação são obtidos dois diagramas de olho praticamente iguais, é necessário saber se o primeiro diagrama corresponde às informações transmitidas a partir do primeiro *smart meter*, assim como se o segundo diagrama de olho diz respeito aos dados transmitidos pelo segundo *smart meter*. Diante disto, alterou-se a taxa de bit do segundo *smart meter* e manteve-se a taxa original do primeiro medidor. Com isto, ao verificar os diagramas de olho correspondentes, no caso do primeiro *smart meter* não houve mudança no diagrama de olho, pois sua taxa de bits não foi alterada. No entanto,

para o segundo *smart meter* o padrão de olho foi modificado de acordo com a taxa de dados correspondente. Desta forma, sabe-se que os diagramas de olho obtidos são condizentes com as informações enviadas por cada medidor.

Os diagramas de olho obtidos estão mostrados nas Figuras 10 e 11, assim como suas respectivas BER e Fator Q na Tabela 2.

### **3.3 Balanço de potência da rede PON proposta para a transmissão nos sentidos de *downlink* e *uplink***

Uma das análises que deve ser realizada para garantir que o sistema de comunicação apresente um bom desempenho é o balanço de potência. Durante a transmissão do sinal através de uma rede óptica, outros componentes além da fibra óptica atenuam o sinal ao longo do percurso. Ao passar por componentes como acopladores, dispositivos que permitem combinar ou separar sinais ou qualquer outro componente óptico, ocorre a diminuição da intensidade do sinal devido às perdas por divisão e de inserção. A perda por divisão, como o próprio nome já diz, ocorre devido à divisão da potência do sinal óptico. Já a perda por inserção é ocasionada pela estrutura e pela absorção intrínseca do material do qual é construído o dispositivo.

No entanto, essas atenuações do sinal podem ser compensadas através do uso de amplificadores ópticos, que são classificados de acordo com sua localização no enlace. No sistema de comunicação proposto foi necessária a utilização de um amplificador de potência com ganho de 15,5 dB e de um pré-amplificador com ganho de 16 dB. O amplificador de potência é utilizado logo após o transmissor óptico para aumentar a potência de transmissão e o pré-amplificador é usado imediatamente antes do fotodetector para amplificar o pequeno sinal óptico e melhorar a relação sinal-ruído (SNR) no receptor.

A Tabela 1 mostra as atenuações que cada componente utilizado insere no caminho óptico de transmissão, sendo seus valores usados para o balanço de potência da topologia proposta.

Tabela 1 – Perdas de inserção de cada dispositivo óptico.

<b>Componente</b>	<b>Atenuação no sistema</b>
<i>Splitter</i> óptico 1x2	3,70 dB
<i>Splitter</i> óptico 1x3	5,67 dB
Combinador óptico 2x1	0,70 dB
Combinador óptico 3x1	0,90 dB
Chave óptica	1,50 dB
Modulador <i>Mach-Zehnder</i>	7,30 dB
Atenuação da fibra óptica	0,38 dB/km x 20 km = 7,60 dB

Fonte: Autor.

Na Tabela 1, os valores de atenuação dos *splitters* ópticos contabilizam ambas as perdas, de divisão e inserção. No caso dos combinadores, as perdas referem-se somente à perda de inserção, pelo fato de esses componentes não possuírem perdas de divisão. Esses dados foram obtidos através do *datasheet* de dispositivos usualmente empregados em projetos de redes ópticas.

Além das atenuações, outras informações extremamente importantes no cálculo do balanço de potência são a potência do transmissor e a sensibilidade do receptor. Para a potência de emissão dos lasers foram empregados os níveis de -14 dBm, -5,7 dBm e -5,8 dBm, para os canais de 1250 nm, 1270 nm e 1290 nm, respectivamente.

Como a portadora óptica de 1250 nm é utilizada para transportar as informações das subportadoras de RF de 27,5 GHz e 37,5 GHz, há dois cálculos de balanço de potência referentes ao comprimento de onda de 1250 nm, pois como pode ser visto na Figura 5, o sinal passa por diferentes componentes quando percorre o caminho óptico correspondente às subportadoras de 37,5 GHz ou de 27,5 GHz.

A seguir são apresentados os cálculos do balanço de potência para cada portadora óptica utilizada, sendo que  $P_R$  representa a potência que é recebida nos respectivos fotodetectores,  $P_T$  é a potência transmitida,  $G_1$  é o ganho do amplificador de potência,  $G_2$  é o ganho do pré-amplificador,  $\alpha$  é a atenuação causada por cada acoplador e  $M$  é a margem de segurança utilizada para o enlace óptico, cuja magnitude foi definida como 3 dB. Esta margem é considerada no orçamento de potência para compensar a perda de desempenho em função da vida útil do dispositivo ou para possíveis manutenções na rede óptica.

Cálculo do balanço de potência para a portadora óptica de 1250 nm através da subportadora de RF de 27,5 GHz:

$$P_R = P_T - \alpha_{1x2} + G_1 - \alpha_{1x2} - \alpha_{MZ} - \alpha_{CHAVE} - \alpha_{MZ} - \alpha_{2x1} - \alpha_{3x1} - \alpha_{FIBRA} - \alpha_{1x3} - M + G_2$$

$$P_R = -23,87 \text{ dBm}$$

Cálculo do balanço de potência para a portadora óptica de 1250 nm através da subportadora de RF de 37,5 GHz:

$$P_R = P_T - \alpha_{1x2} - \alpha_{MZ} - \alpha_{2x1} - \alpha_{3x1} - \alpha_{FIBRA} - \alpha_{1x3} - M + G_2$$

$$P_R = -26,87 \text{ dBm}$$

Cálculo do balanço de potência para a portadora óptica de 1270 nm:

$$P_R = P_T - \alpha_{3x1} - \alpha_{FIBRA} - \alpha_{1x3} - M$$

$$P_R = -22,87 \text{ dBm}$$

Cálculo do balanço de potência para a portadora óptica de 1290 nm:

$$P_R = P_T - \alpha_{3x1} - \alpha_{FIBRA} - \alpha_{1x3} - M$$

$$P_R = -22,97 \text{ dBm}$$

A potência utilizada para a portadora óptica de 1270 nm foi de -5,7 dBm, enquanto para a portadora óptica de 1290 nm foi de -5,8 dBm, o que justifica a diferença entre as potências recebidas em seus respectivos APDs de 0,1 dB. Estes níveis de potência de transmissão foram ajustados com bastante critério, de modo a garantir a qualidade de comunicação necessária em todas as portadoras ópticas empregadas.

Considerando-se que a sensibilidade do fotodetector empregado é de -32 dBm, os resultados obtidos através dos balanços de potência realizados atestam o bom desempenho do sistema no que tange ao nível de potência necessário a uma boa recuperação da informação transmitida. O balanço de tempo foi dispensado em função de terem sido empregados lasers monomodo, das taxas de dados

empregadas e da baixa distância de propagação, dados que por si só indicam larga margem de tolerância à dispersão dos dados.

Convém ainda destacar que a topologia usada para realizar a transmissão dos dados no sentido de *uplink* é a mesma daquela empregada no sentido de *downlink*, porém com a disposição dos componentes invertida. Logo, todas as considerações feitas até aqui para o sentido de *downlink* são perfeitamente aplicáveis ao sentido contrário de transmissão e ainda os resultados obtidos para as portadoras ópticas de 1250 nm, 1270 nm e 1290 nm indicam resultados semelhantes para as portadoras de 1310 nm, 1330 nm e 1350 nm, respectivamente. O Apêndice C apresenta a topologia de transmissão, enquanto o Apêndice D apresenta a topologia de recepção implementada no *software* de simulação para o sentido de *uplink*.

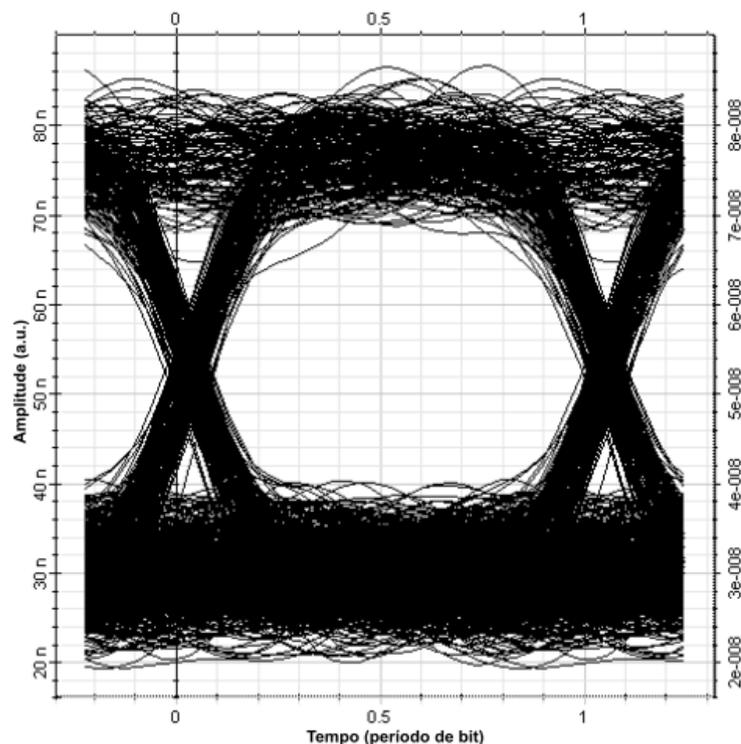
## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo está organizado da seguinte maneira: a seção 4.1 apresentará os resultados obtidos para o teste da técnica de multiplexação TDM empregada, ou seja, as informações referentes à transmissão dos dados agregados dos *smart meters* antes de os mesmos serem acoplados ao sistema com a técnica de multiplexação A-RoF. A seção 4.2 mostrará os resultados obtidos no sentido de *downlink*, que representa o sentido de comunicação entre a concessionária e os medidores. Os resultados para o sentido de *uplink*, referente à comunicação dos *smart meters* à concessionária de energia são apresentados na seção 4.3, sendo que nas seções 4.2 e 4.3 a comunicação entre os *smart meters* e a concessionária é feita através da rede PON utilizando a técnica de multiplexação A-RoF.

### 4.1 Multiplexação TDM dos dados de dois *smart meters*

Os sistemas simulados para a obtenção dos resultados mostrados nesta seção correspondem aos da seção 3.2. A Figura 10 apresenta o diagrama de olho referente às informações enviadas a partir do *smart meter* um, mostrado na Figura 7.

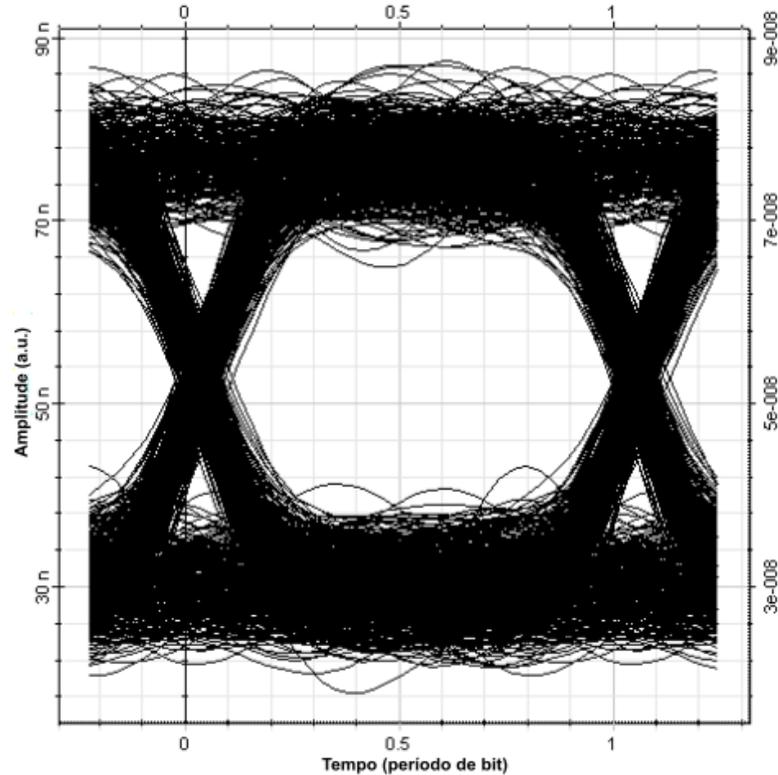
Figura 10 – Diagrama de olho referente aos dados do primeiro *smart meter* da Figura 7.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

A Figura 11 apresenta o diagrama de olho referente às informações transmitidas a partir do *smart meter* dois, mostrado na Figura 7.

Figura 11 – Diagrama de olho referente aos dados do segundo *smart meter* da Figura 7.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Uma das formas de avaliar, qualitativamente, o desempenho do sistema óptico de comunicação e, portanto, a qualidade do sinal recebido é através do diagrama de olho, que recebe essa nomenclatura devido ao fato de a imagem resultante ser parecida com a abertura de um olho. Dependendo das características obtidas pelo padrão do olho, pode-se deduzir algumas informações sobre o sistema analisado. A barra superior em um diagrama de olho indica o nível lógico 1, assim como a barra inferior representa o nível lógico 0. Apesar do intenso ruído presente em ambos os níveis lógicos, percebe-se que os diagramas de olho das Figuras 10 e 11 possuem uma grande abertura, pois os níveis lógicos estão distantes um do outro, o que indica uma boa capacidade de recuperar as informações transmitidas.

Além disso, os sistemas de comunicações ópticas definem um valor de BER para especificar, quantitativamente, os requisitos mínimos de desempenho do sistema. Sabe-se que os erros em um sistema de transmissão de dados são inevitáveis, porém espera-se que ocorram com uma taxa extremamente baixa. Diante disso, de acordo com normas da ITU-T, atualmente o valor de BER aceitável

para os sistemas ópticos de comunicação comercial é na ordem de  $10^{-12}$ , ou seja, a ocorrência de um bit errado a cada 1 trilhão de bits transmitidos. A Tabela 2 mostra a BER e o Fator Q dos respectivos diagramas de olho mostrados nas Figuras 10 e 11, estimados pelo *software Optisystem* a partir das simulações realizadas.

Tabela 2 – BER e Fator Q para a multiplexação por divisão no tempo dos *smart meters*.

Figura	BER	Fator Q
10	2,46e-14	7,51
11	6,07e-13	7,10

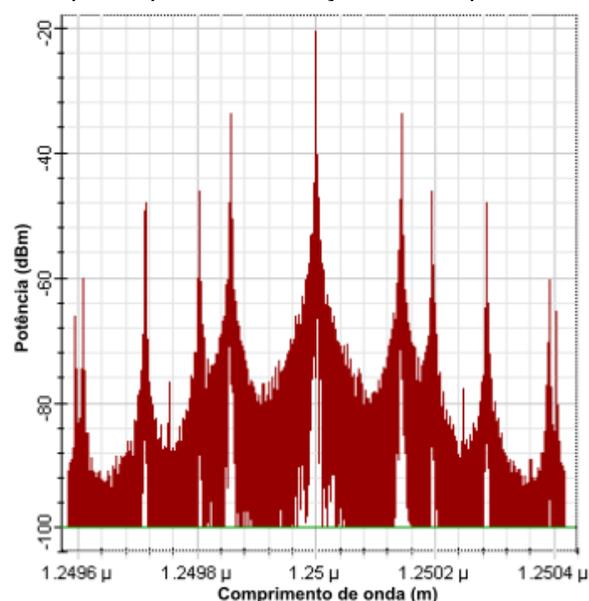
Fonte: Autor.

As BER obtidas mostram que o desempenho do sistema de multiplexação dos dados dos *smart meters* está de acordo com o padrão de erros estabelecido para os sistemas de comunicações ópticas, pois obteve-se taxas menores que  $10^{-12}$ , indicando que a topologia proposta está apta para ser acoplada a topologia de rede óptica implementada utilizando a técnica de multiplexação A-RoF.

## 4.2 Propagação no sentido de *downlink*

Os sistemas simulados para a obtenção dos resultados mostrados nesta seção correspondem aos da seção 3.1. A Figura 12 mostra o espectro óptico após o combinador 2x1 mostrado na Figura 5, que combina opticamente os sinais modulados em 27,5 GHz e 37,5 GHz.

Figura 12 – Espectro óptico após a combinação das subportadoras de RF - *downlink*.

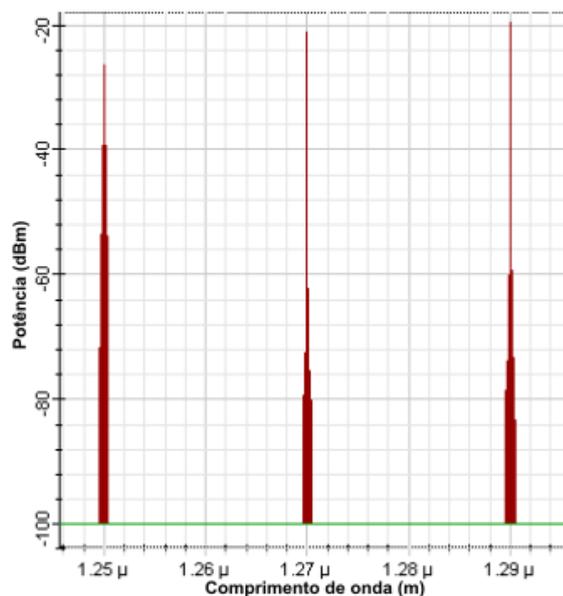


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Como é mostrado na Figura 5, ambas as subportadoras de RF compartilham a mesma portadora óptica de 1250 nm. Diante disso, percebe-se na Figura 12 a presença das bandas laterais das subportadoras de 27,5 GHz e 37,5 GHz em torno da portadora óptica, que surgem após o processo de modulação em amplitude. Neste processo, as bandas laterais devem estar espaçadas em torno da portadora com distâncias equivalentes a frequência que foi utilizada, ou seja, 27,5 GHz e 37,5 GHz. Na conversão da frequência para comprimento de onda, 27,5 GHz corresponde a um espaçamento de 0,22 nm, enquanto 37,5 GHz refere-se a um espaçamento de 0,30 nm. Dessa forma, verifica-se na Figura 12 a banda lateral correspondente à frequência de 37,5 GHz próxima de 1250,3 nm, assim como a banda lateral referente à frequência de 27,5 GHz próxima de 1250,2 nm. No entanto, há também a presença de um sinal em torno do comprimento de onda de 1250,15 nm. Esse sinal, provavelmente, é uma repetição da banda lateral da subportadora de 37,5 GHz, por estar localizado exatamente em um múltiplo do espaçamento de 0,30 nm.

A Figura 13 mostra o espectro óptico após o combinador de potências 3x1 que é mostrado na Figura 5, ilustrando a transmissão das três portadoras ópticas no sentido de *downlink*.

Figura 13 – Espectro óptico após o combinador de potências 3x1 no sentido de *downlink*.

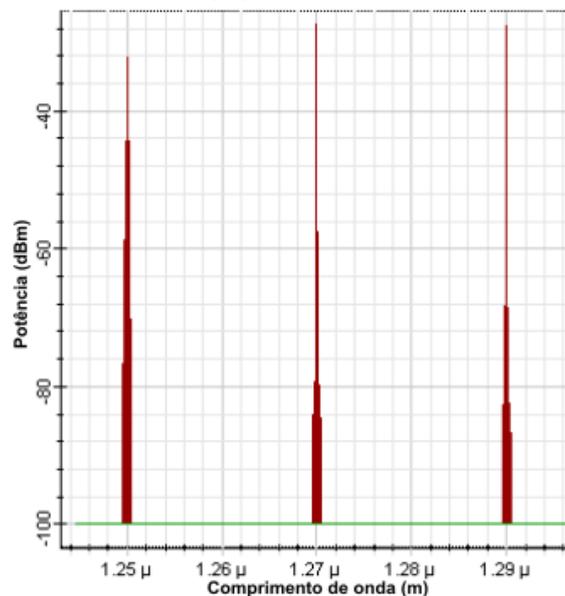


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

A Figura 13 mostra a combinação das três portadoras ópticas utilizadas: 1250 nm, 1270 nm e 1290 nm. A portadora de 1250 nm transporta as informações do tráfego agregado das redes *wireless* 5G, enquanto as portadoras de 1270 nm e 1290 nm são responsáveis pela transmissão das informações dos clientes da rede óptica passiva. Nota-se uma pequena diferença na intensidade dos sinais transmitidos: as potências de transmissão dos lasers para as portadoras de 1270 nm e 1290 nm foram de, -5.7 dBm e -5.8 dBm, respectivamente, enquanto para a portadora de 1250 nm foi de -14 dBm. Percebe-se que a diferença entre as potências de transmissão dos lasers foi compensada, em grande parte, pelo uso do amplificador de potência no canal de 1250 nm, pois mesmo após as perdas causadas pelos diversos acopladores usados para a multiplexação dos dados dos *smart meters*, a intensidade do sinal da portadora óptica de 1250 nm se aproximou dos valores alcançados pelas outras duas subportadoras, dada a diferença de intensidade das potências lançadas na fibra.

Após a combinação das portadoras ópticas, o sinal é transmitido por uma fibra óptica SSMF com atenuação de 0,38 dB/km, ao longo de 20 km. A Figura 14 mostra o espectro das portadoras após a transmissão pela fibra óptica.

Figura 14 – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra óptica no sentido de *downlink*.

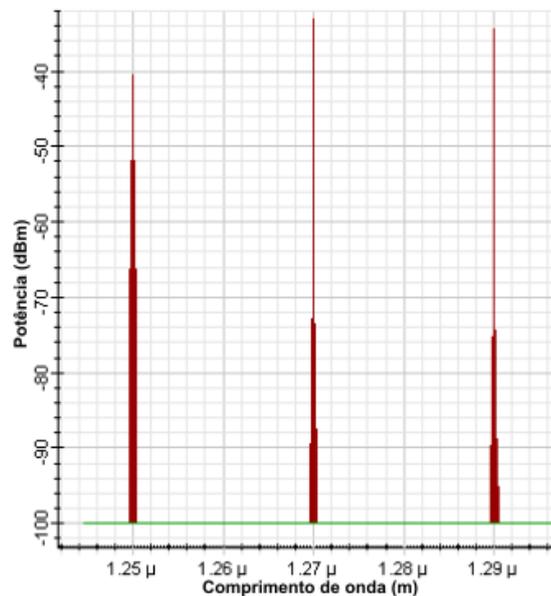


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Na Figura 14 é possível perceber que após a propagação pela fibra óptica o sinal apresenta uma atenuação em relação ao espectro que é mostrado na Figura 13. A atenuação varia de acordo com a distância de propagação na fibra. Como foi utilizado uma distância de 20 km e a atenuação da fibra é de 0,38 dB/km, o sinal da Figura 14 possui uma atenuação de 7,6 dB em relação ao espectro que é mostrado na Figura 13.

A Figura 15 mostra o espectro óptico após o *splitter* 1x3 mostrado na Figura 6.

Figura 15 – Espectro óptico após o *splitter* 1x3 no sentido de *downlink*.

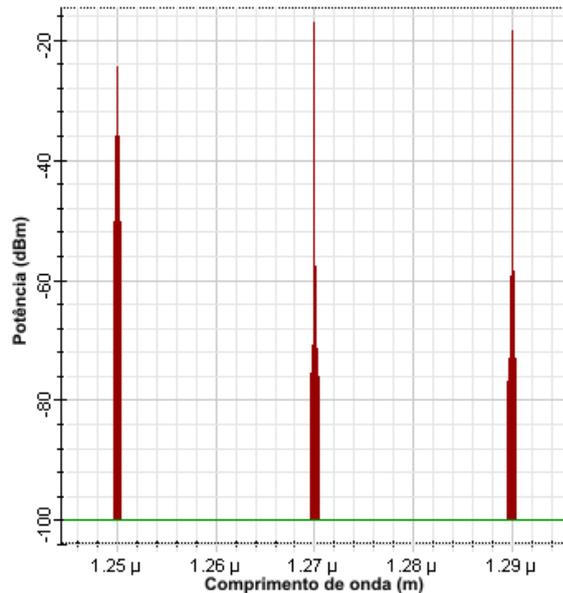


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

No *software* de simulação, assim que são adicionados os *splitters*, a perda por divisão já é inserida no próprio componente. Porém, é necessário adicionar a perda de inserção dos dispositivos. Por exemplo, na Figura 6, que mostra o sistema de recuperação das informações, as perdas que aparecem nos *splitters* significam as perdas de inserção de cada componente. Diante disso, a Figura 15 mostra a mesma representação do espectro da Figura 14, porém com o sinal atenuado em 3,6 dB, sendo 3 dB ocasionado pela perda de divisão do dispositivo e 0,6 dB devido à sua perda de inserção.

A Figura 16 apresenta o espectro óptico logo após o pré-amplificador, mostrado na Figura 6.

Figura 16 – Espectro óptico após o pré-amplificador no sentido de *downlink*.

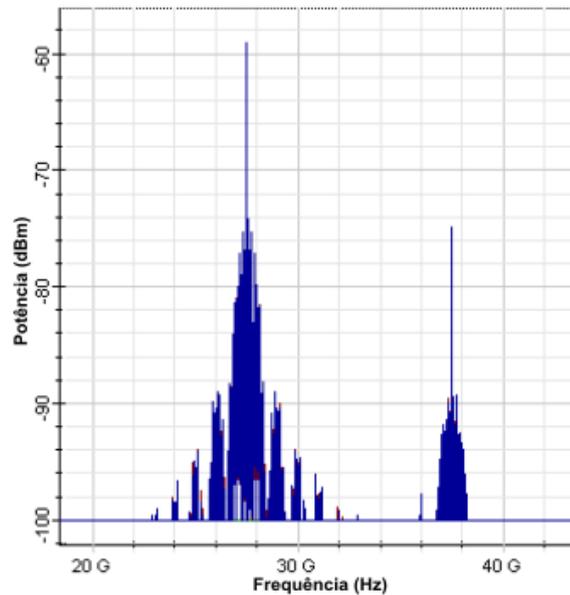


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através da Figura 15 percebe-se que o nível do sinal óptico após percorrer os 20 km de fibra óptica e passar pelo *splitter* 1x3 já é relativamente pequeno, com nível pouco superior à -40 dBm. Após o APD com frequência central de 1250 nm, o sinal ainda passará por diversos componentes até a recuperação da informação transmitida. Diante disso, foi utilizado um pré-amplificador com ganho de 16 dB para aumentar o nível do sinal antes da fotodetecção e permitir que percorra todas as etapas de recuperação dos dados com um nível de potência mais alto, desta forma melhorando a SNR na recepção. Com isso, na Figura 16 é possível verificar o aumento da intensidade do sinal óptico após o pré-amplificador em 16 dB.

A Figura 17 apresenta o espectro elétrico logo após o APD centrado em 1250 nm, mostrado na Figura 6.

Figura 17 – Espectro elétrico após o APD centrado em 1250 nm.

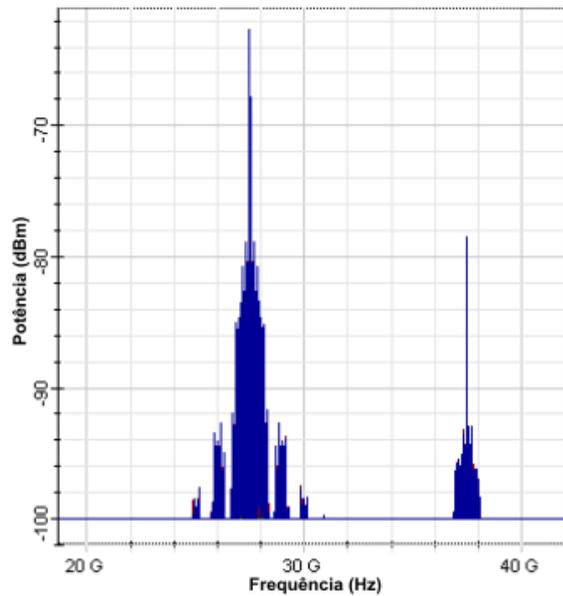


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

O primeiro componente do receptor de um sistema óptico de comunicação é o fotodetector. Ele é responsável pela conversão do sinal óptico em uma corrente elétrica e um dos seus principais requisitos é uma boa sensibilidade, ou seja, deve ser capaz de detectar sinais ópticos de baixa intensidade. Na Figura 17 é possível verificar o espectro do sinal elétrico após o fotodetector centrado em 1250 nm, lembrando que através desta portadora óptica foram transportadas as informações das subportadoras de RF de 27,5 GHz e 37,5 GHz. Dessa forma, depois da demodulação da portadora óptica pelo APD é possível verificar a presença das subportadoras de RF no espectro elétrico.

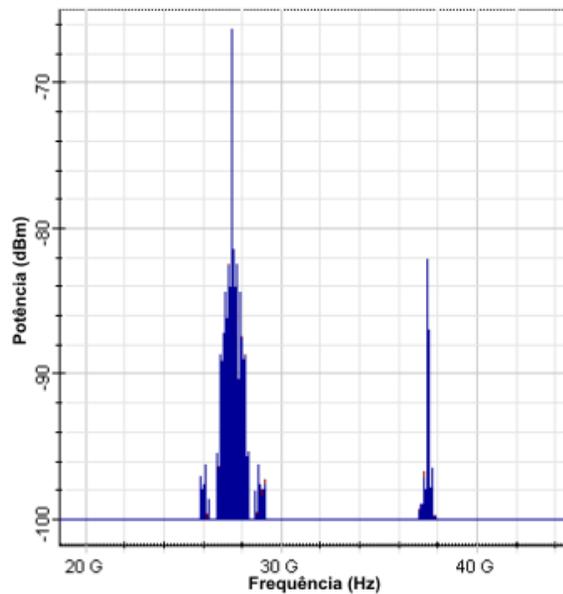
A Figura 18 mostra o espectro elétrico das subportadoras de RF após o primeiro *splitter*, enquanto a Figura 19 mostra o espectro elétrico após o segundo *splitter* mostrado na Figura 6.

Figura 18 – Espectro elétrico após o primeiro *splitter* 1x2 no sentido de *downlink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 19 – Espectro elétrico após o segundo *splitter* 1x2 no sentido de *downlink*.

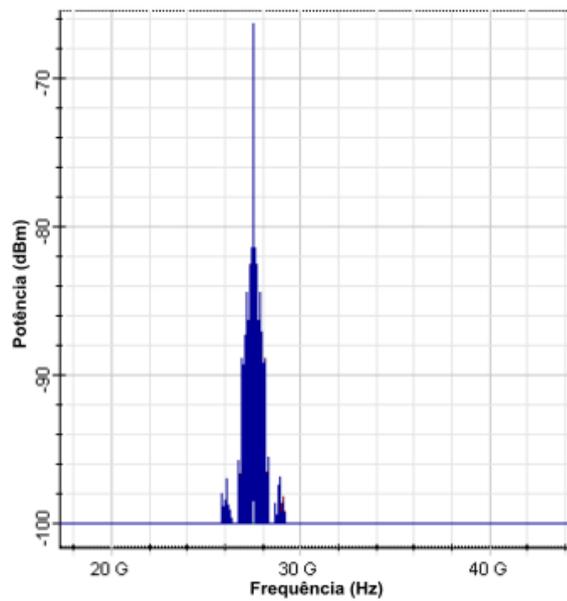


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Como mencionado anteriormente, após o *splitter* ocorre a atenuação do sinal devido as perdas de divisão e de inserção. Logo, na Figura 18 verifica-se o mesmo sinal da Figura 17, porém atenuado em 3,6 dB, devido as perdas do dispositivo. Da mesma forma, a Figura 19 apresenta o sinal atenuado em 3,6 dB em relação ao mostrado na Figura 18.

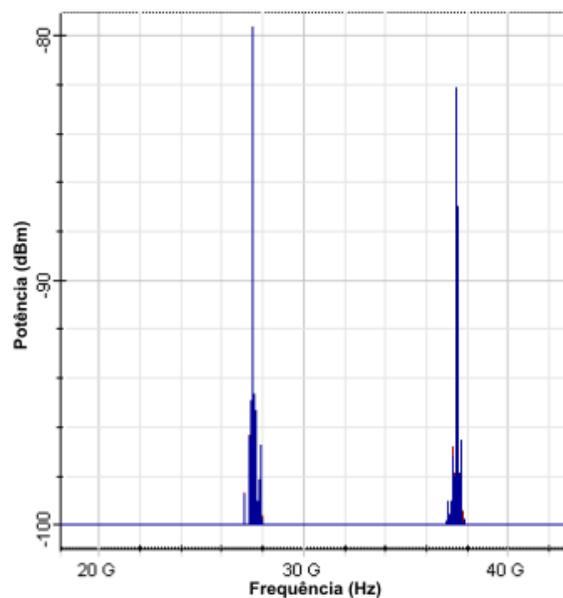
Como as duas subportadoras de RF foram transmitidas através da portadora óptica de 1250 nm, para recuperar as informações de cada subportadora é utilizado o método de detecção mostrado na Figura 6. A Figura 20 mostra o espectro após o filtro passa-faixa de 27,5 GHz, assim como a Figura 21 mostra o espectro elétrico após o filtro de 37,5 GHz.

Figura 20 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz no sentido de *downlink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 21 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz no sentido de *downlink*.



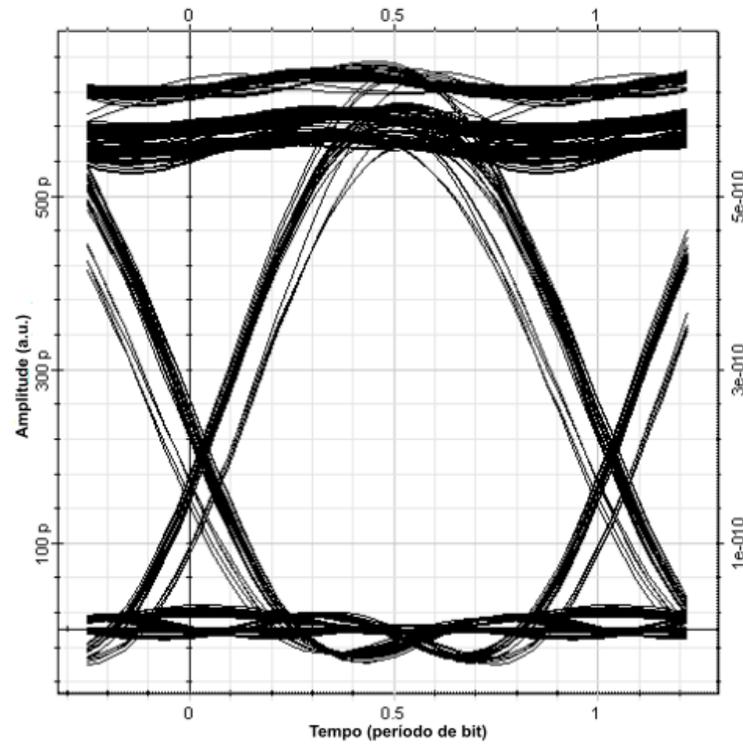
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através da Figura 20 é possível perceber que após o filtro centrado em 27,5 GHz, a subportadora de 37,5 GHz foi eliminada. No entanto, na Figura 21 verifica-se que mesmo após o filtro passa-faixa com frequência central de 37,5 GHz, há a presença da subportadora de 27,5 GHz. Isso aconteceu porque a largura de banda utilizada não foi estreita o suficiente para realizar a filtragem somente da subportadora de 37,5 GHz, além do que a intensidade da portadora de 27,5 GHz é maior em função do emprego do pré-amplificador óptico. Ao reduzir a largura de banda no processo de recuperação do canal de 37,5 GHz, o diagrama de olho correspondente não apresentou um bom resultado, logo decidiu-se manter o filtro com uma largura de banda maior como forma de não comprometer o diagrama de olho. Apesar disso, percebe-se que o espectro elétrico da subportadora de 27,5 foi bastante modificado em relação ao espectro que é mostrado antes da filtragem, na Figura 19, ou seja, apesar do filtro não possuir a eficiência necessária, ele reduziu bastante o espectro da subportadora que carrega as informações dos *smart meters*.

Diante disto, como forma de verificar se o diagrama de olho obtido ao final do sistema de recuperação realmente mostrava as informações referentes ao canal de 37,5 GHz, foram realizados os mesmos testes de variação da taxa de transmissão realizados anteriormente, ou seja, ao modificar a taxa de bits correspondente à uma das subportadoras e analisar os diagramas de olho de todos os diferentes canais, verificou-se que estes não apresentavam mudanças, exceto pelo diagrama de olho referente à subportadora de 37,5 GHz, que alterava de acordo com a taxa de bits utilizada. Com isso, sabe-se que, apesar da presença da subportadora de 27,5 GHz após o filtro passa-faixa, as informações que são geradas pelo diagrama de olho da Figura 24 correspondem ao canal de 37,5 GHz.

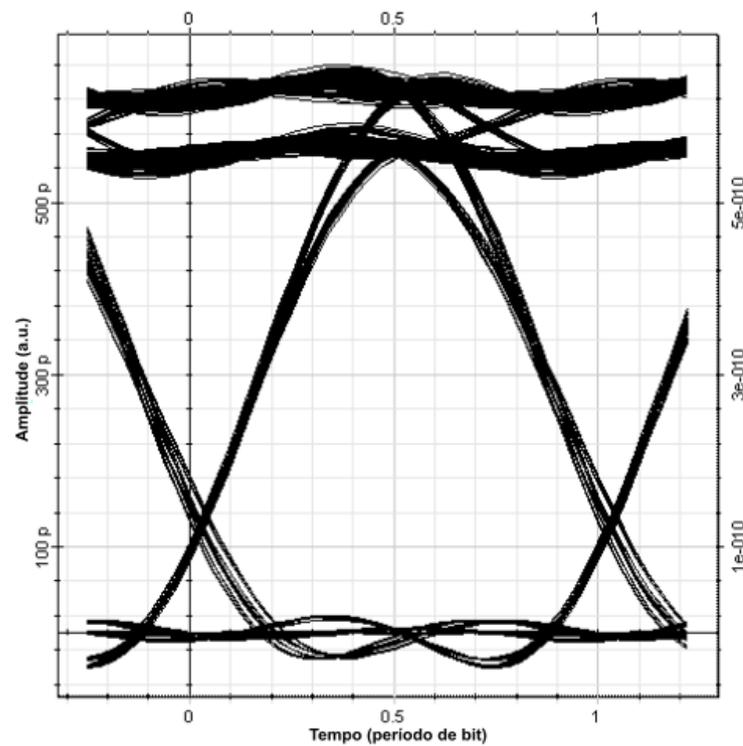
As Figuras 22 à 26 mostram os diagramas de olho obtidos referentes ao sentido de *downlink*.

Figura 22 – Diagrama de olho: primeiro *smart meter* no sentido de *downlink*.



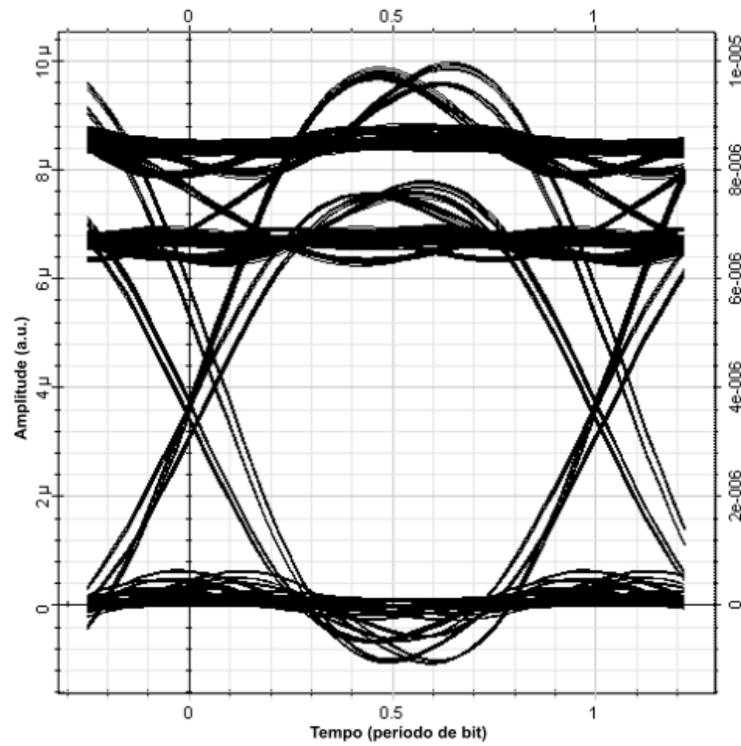
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 23 – Diagrama de olho: segundo *smart meter* no sentido de *downlink*.



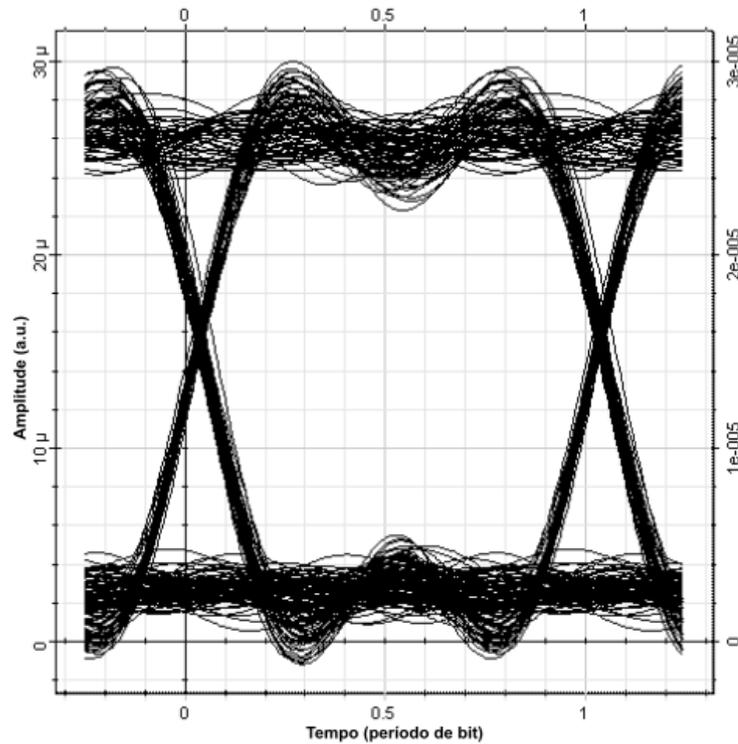
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 24 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1250nm no sentido de *downlink*.



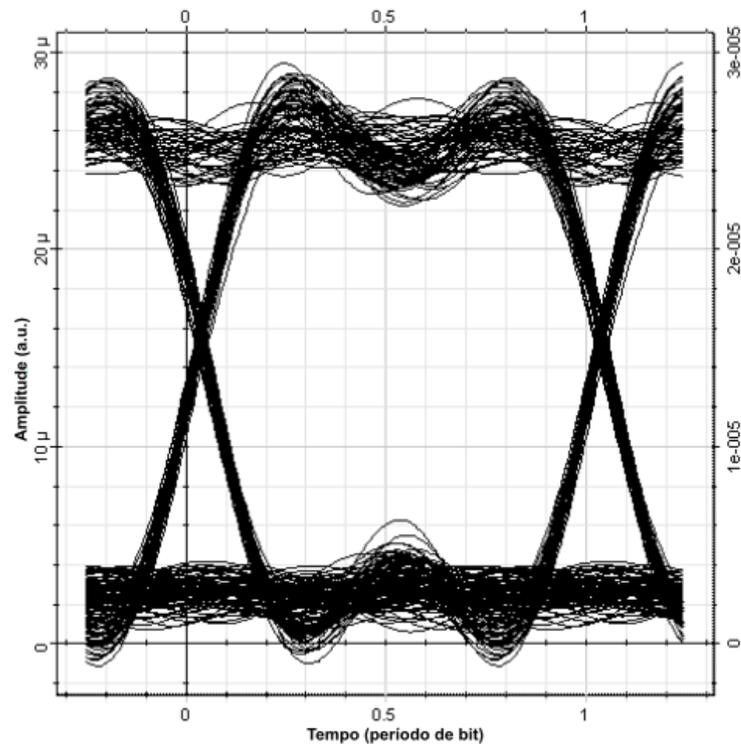
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 25 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1270 nm no sentido de *downlink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 26 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1290 nm no sentido de *downlink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através das Figuras 22 à 26, verifica-se que todos os diagramas de olho possuem uma grande abertura, pois os níveis lógicos estão bem distantes um do outro. A largura nos pontos de cruzamento, que indica a sensibilidade à dispersão do sistema (quanto maior a dispersão, maior a largura dos pontos de cruzamento), está relacionada com a taxa de transmissão do sistema, ou seja, quanto maior for a taxa de bits utilizada, menor será essa largura, diminuindo horizontalmente o padrão do olho. Diante disso, percebe-se que a largura nos pontos de cruzamento é pequena, indicando a baixa sensibilidade do sistema à dispersão (o que corrobora a dispensa da necessidade do cálculo do balanço de tempo para o sistema em questão) e mostrando que a taxa de dados utilizada poderia aumentar e ainda assim seria possível obter um diagrama de olho com uma boa abertura.

No *software* de simulação o mesmo componente que mostra os diagramas de olho também informa os respectivos valores de BER para cada padrão de olho obtido. Diante disso, a Tabela 3 apresenta as taxas de erro obtidas para cada diagrama de olho mostrado nas figuras anteriores, assim como o Fator Q, outro parâmetro que complementa a análise da qualidade do sistema de comunicação.

Tabela 3 – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados: *downlink*

<b>Figura</b>	<b>BER</b>	<b>Fator Q</b>
22	4,40e-85	19,44
23	3,20e-54	15,41
24	1,17e-15	7,84
25	2,15e-53	15,33
26	3,04e-56	15,75

Fonte: Autor.

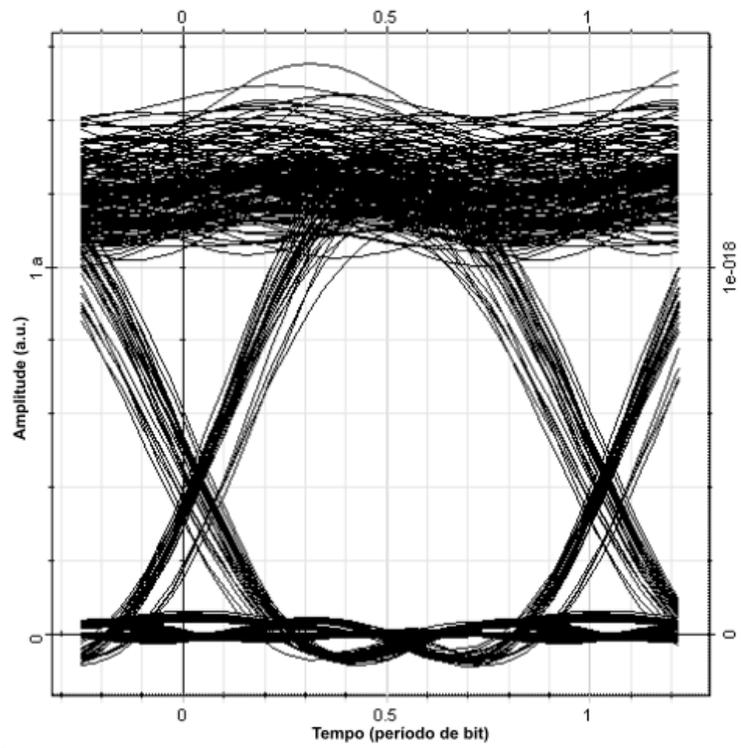
Diante dos resultados apresentados na Tabela 3, percebe-se que os requisitos em termos de taxa de erro de bit foram alcançados, ou seja, o sistema proposto apresentou um bom desempenho ao atingir uma BER menor do que  $10^{-12}$  em todas as medidas.

No entanto, como pode-se observar, as taxas obtidas para as Figuras 22 e 23, que representam o canal de comunicação da concessionária com os *smart meters*, foram extremamente pequenas, assim como as taxas alcançadas para as Figuras 25 e 26, que simbolizam as informações transmitidas pelos usuários da rede óptica passiva. Esses pequenos valores de BER indicam a necessidade de ajuste dos níveis de potência de transmissão destes canais.

A grande abertura do olho observada em todas as figuras mostradas anteriormente, assim como os valores de BER mostrados na Tabela 3, indicam que a potência de transmissão dos lasers pode ser diminuída consideravelmente e não prejudicará os resultados obtidos.

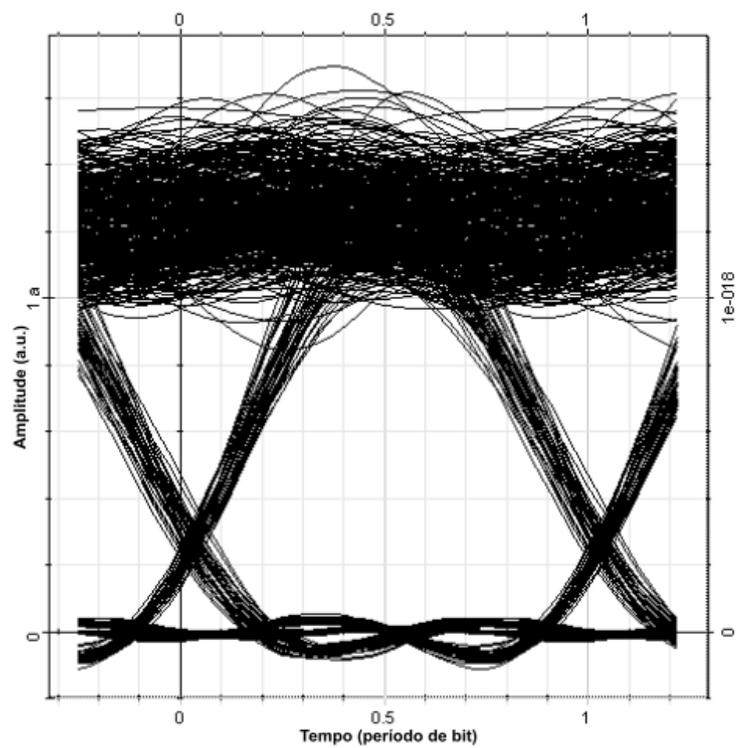
As Figuras 22 à 26 mostram os diagramas de olho obtidos antes do ajuste de potência, sendo utilizado uma potência de transmissão de 7,7 dBm para o laser de 1250 nm, -1,7 dBm para o laser de 1270 nm e -1,8 dBm para o laser de 1290nm. Para fins de ilustração e comparação, as Figuras 27 a 31 mostram os diagramas de olho obtidos após o ajuste de potência, com potências de transmissão de -14 dBm para o laser de 1250 nm, -5,7 dBm para o laser de 1270 nm e -5,8 dBm para o laser de 1290nm.

Figura 27 – Diagrama de olho: primeiro *smart meter* com ajuste de potência - *downlink*.



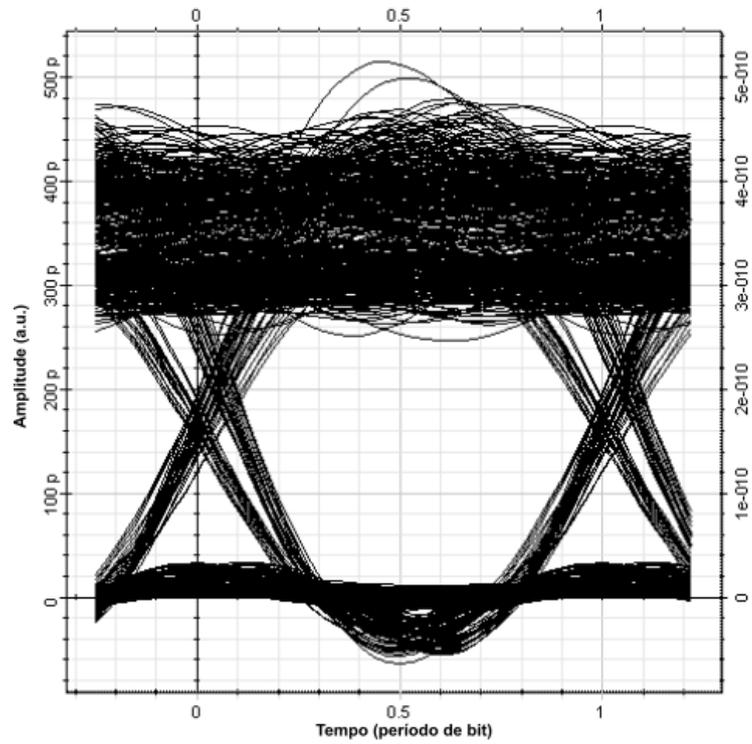
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 28 – Diagrama de olho: segundo *smart meter* com ajuste de potência - *downlink*.



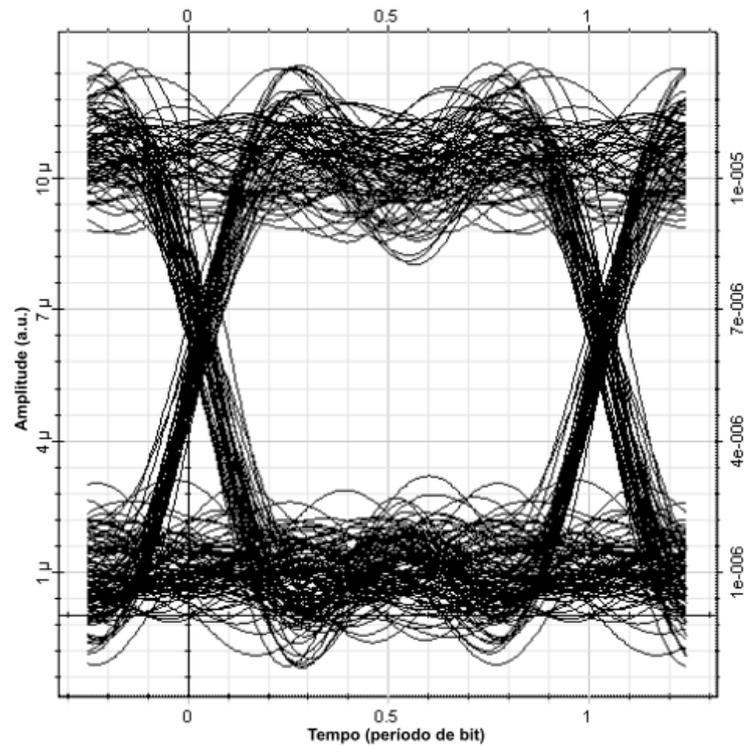
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 29 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1250nm, com ajuste de potência-*downlink*.



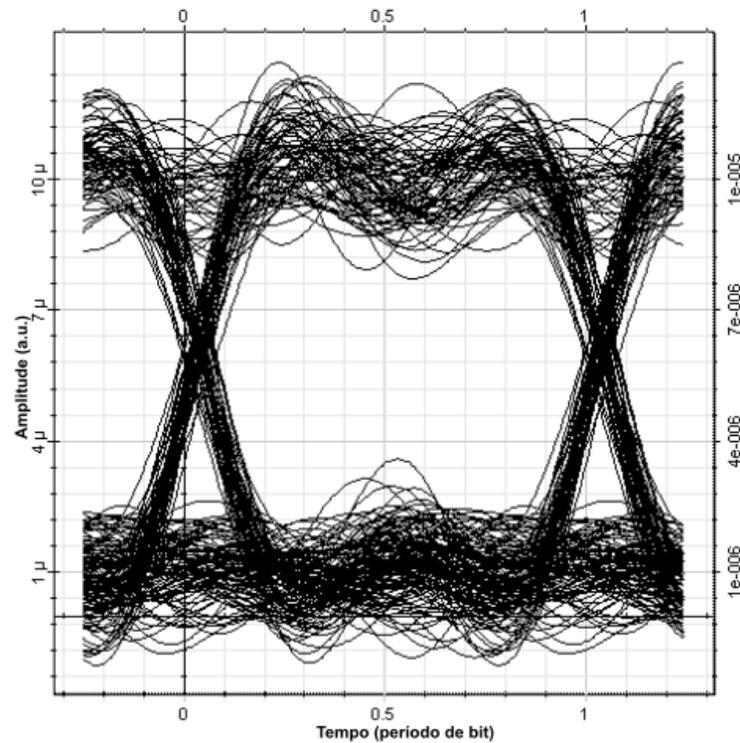
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 30 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1270 nm, com ajuste de potência - *downlink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 31 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1290 nm, com ajuste de potência - *downlink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Após o ajuste de potências, apesar do nível lógico 1 apresentar um ruído muito maior, caracterizado por essas linhas aleatórias presentes na faixa superior das Figuras 27, 28 e 29, percebe-se que os dois níveis lógicos estão bem afastados, o que significa uma boa capacidade de distinção entre os níveis. Esta característica do diagrama de olho influencia diretamente na taxa de erro de bit, pois uma grande altura do olho significa uma BER menor, assim como uma pequena altura representa um olho quase fechado com uma probabilidade muito maior de erros, o que ocasiona uma grande taxa de erro de bit. No entanto, para as Figuras 30 e 31, o ruído nos níveis lógicos 1 e 0 são equivalentes, diferentemente dos casos anteriores, em que o ruído no nível lógico 1 foi muito mais intenso.

Ao comparar as Figuras 22 à 26 com as Figuras 27 à 31 percebe-se que antes do ajuste das potências de transmissão do sistema, os diagramas de olho possuem uma abertura muito maior e um ruído menos intenso. Porém, os resultados obtidos após os ajustes de potência, Figuras 27 à 31, indicam uma boa recuperação das informações transmitidas devido à abertura dos padrões de olho obtidos e dos seus correspondentes valores de BER e Fator Q da Tabela 4.

Tabela 4 – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados com ajuste de potência: *downlink*

<b>Figura</b>	<b>BER</b>	<b>Fator Q</b>
27	2,83e-41	13,31
28	8,72e-25	10,14
29	2,07e-12	6,85
30	6,32e-13	7,09
31	3,76e-13	7,16

Fonte: Autor.

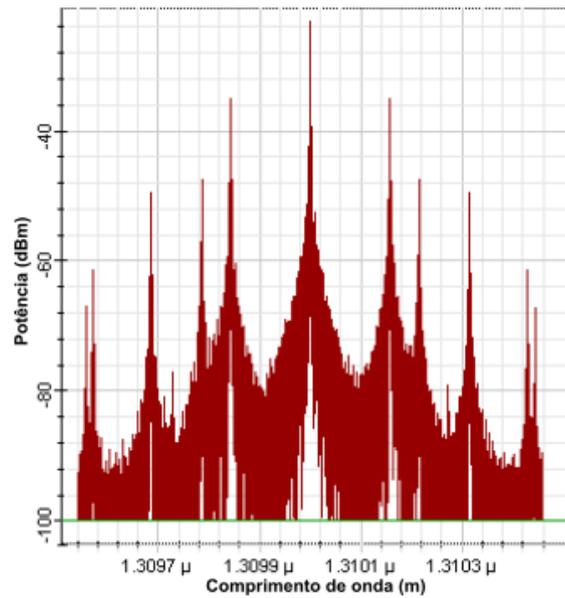
Através das Tabelas 3 e 4, percebe-se a diferença das taxas de erro de bit obtidas quando foram diminuídas as potências de transmissão dos lasers. Porém, no caso específico da subportadora de RF de 37,5 GHz, a alteração da potência não interferiu muito nos valores de BER, pois ao variar a potência de 7,7 dBm à -14 dBm a taxa de erro mudou de  $1,17 \times 10^{-15}$  para  $2,07 \times 10^{-12}$ .

Apesar das taxas de erro para as Figuras 27 e 28 ainda serem muito pequenas, quando comparadas com as outras taxas obtidas, valores menores de potência de transmissão foram testados, mas resultaram em diagramas de olho fechados, o que indica o acerto do dimensionamento do sistema óptico proposto, ou seja, sem superdimensionamento.

### 4.3 Propagação no sentido de *uplink*

Lembrando que para o sentido de *uplink*, o diagrama de blocos das Figuras 5 e 6 continuam sendo válidos, pois a topologia é idêntica para ambos os sentidos de transmissão, sendo invertida somente a disposição dos seus componentes. Porém, o sentido de *uplink* representa a comunicação dos *smart meters* com a concessionária de energia e para isso foram utilizados os comprimentos de onda de 1310 nm, 1330 nm e 1350 nm. A Figura 32 mostra o espectro óptico após o combinador 2x1 mostrado na Figura 5, que combina opticamente os sinais modulados em 27,5 GHz e 37,5 GHz.

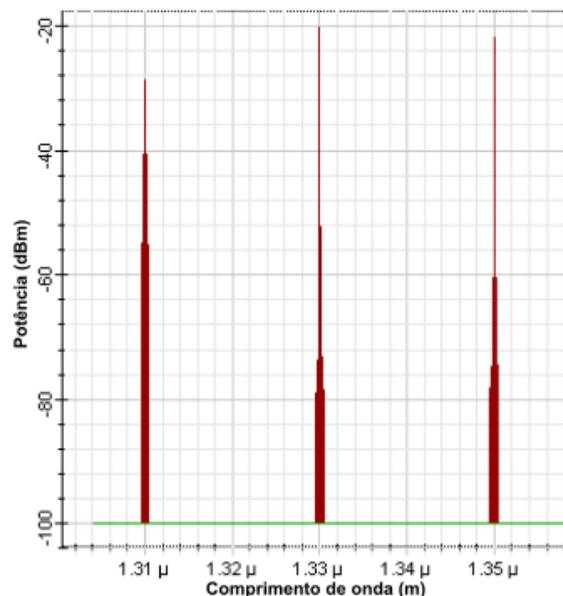
Figura 32 – Espectro óptico após a combinação das subportadoras de RF no sentido de *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Assim como mencionado anteriormente para o sentido de *downlink*, após o processo de modulação em amplitude, surgem as bandas laterais das subportadoras em torno da portadora óptica. Porém, no sentido de *uplink*, como é utilizado a portadora óptica de 1310 nm para transportar as informações de ambas as subportadoras de RF, as bandas laterais estão localizadas próximas de 1310,3 nm e 1310,2 nm, que correspondem as subportadoras de 37,5 GHz e 27,5 GHz, respectivamente. A Figura 33 mostra o espectro óptico após o combinador de potências 3x1 que é mostrado na Figura 5.

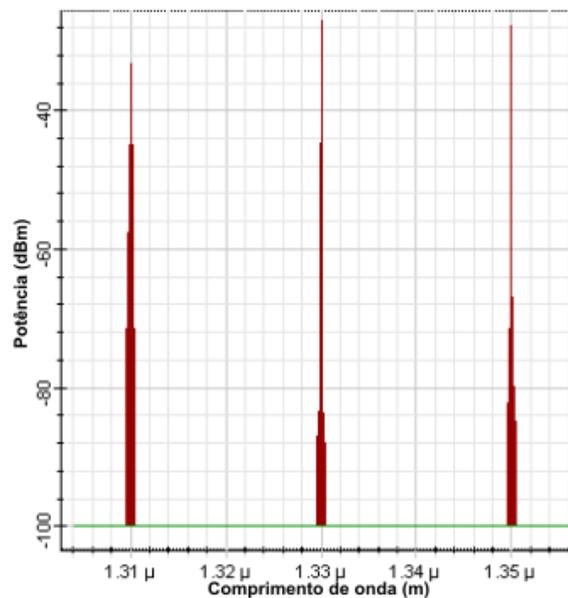
Figura 33 – Espectro óptico após o combinador de potências 3x1 no sentido de *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

A Figura 33 mostra a combinação das três portadoras ópticas utilizadas no sentido de *uplink*: 1310 nm, 1330 nm e 1350 nm, sendo que a portadora de 1310 nm transporta as informações do tráfego agregado das redes *wireless* 5G, enquanto as portadoras de 1330 nm e 1350 nm são responsáveis pelas informações dos clientes da rede óptica passiva. Assim como aconteceu para o sentido de *downlink*, também foi necessário a utilização de um amplificador de potência no canal de 1310 nm, para compensar as perdas causadas pelos diversos acopladores usados para a multiplexação dos dados enviados dos *smart meters* até a concessionária. Após a combinação das portadoras ópticas, o sinal é transmitido por uma fibra óptica SSMF com atenuação de 0,38 dB/km, ao longo de 20 km. A Figura 34 mostra o espectro das portadoras após a transmissão pela fibra óptica.

Figura 34 – Espectro óptico após a propagação por 20 km de fibra óptica no sentido de *uplink*.

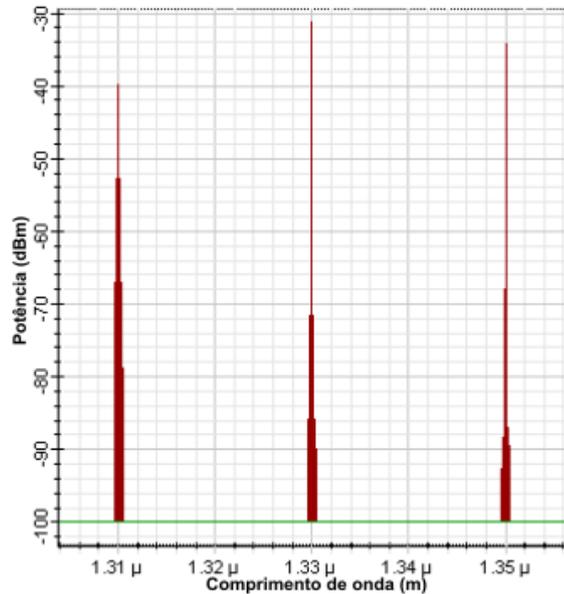


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Na Figura 34 é possível perceber que após a propagação pela fibra óptica o sinal apresenta uma atenuação em relação ao espectro que é mostrado na Figura 33. Como foi utilizada uma distância de 20 km e a atenuação da fibra é de 0,38 dB/km, o sinal da Figura 34 possui uma atenuação de 7,6 dB em relação ao espectro da Figura 33.

A Figura 35 mostra o espectro óptico após o *splitter* 1x3 mostrado no Apêndice D.

Figura 35 – Espectro óptico após o *splitter* 1x3 no sentido de *uplink*.

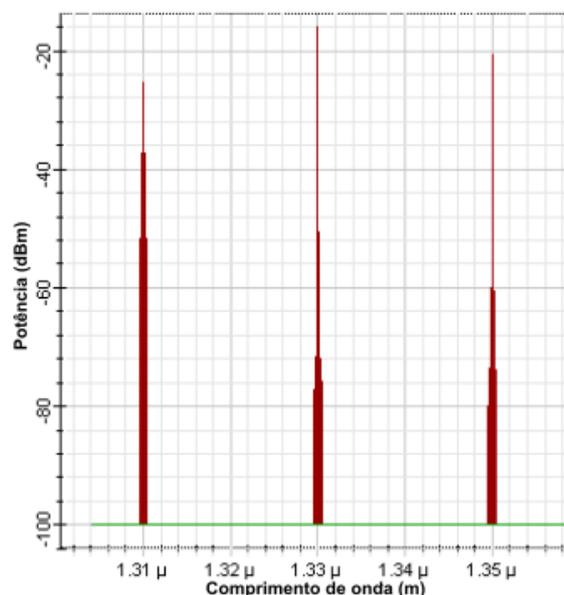


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Na Figura 35 é possível verificar a mesma representação do espectro da Figura 34, porém com o sinal atenuado em 3,6 dB, sendo 3 dB ocasionado pela perda de divisão do *splitter* 1x3 e 0,6 dB devido à sua perda de inserção.

A Figura 36 apresenta o espectro óptico logo após o pré-amplificador, mostrado no Apêndice D.

Figura 36 – Espectro óptico após o pré-amplificador no sentido de *uplink*.

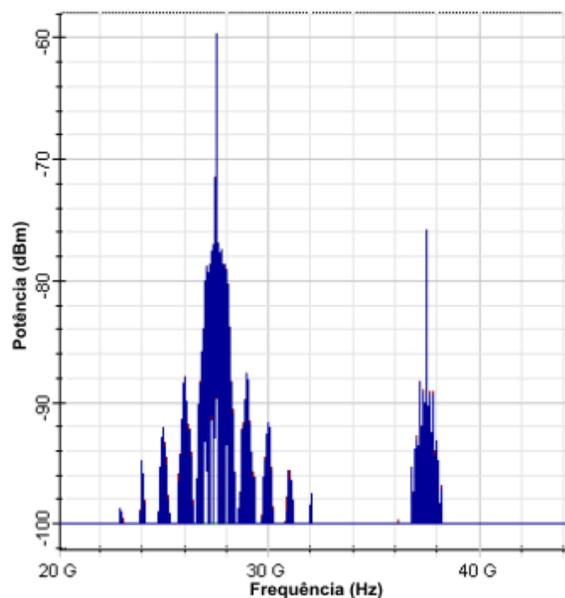


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através da Figura 36 é possível perceber que o nível de intensidade do sinal foi amplificado, chegando próximo de -20 dBm para a portadora de 1310 nm, Isso permitirá que o sinal percorra todas as etapas de recuperação das informações após o APD com um nível de potência mais elevado.

A Figura 37 apresenta o espectro logo após o APD centrado em 1310 nm, mostrado no Apêndice D.

Figura 37 – Espectro elétrico após o APD centrado em 1310 nm.

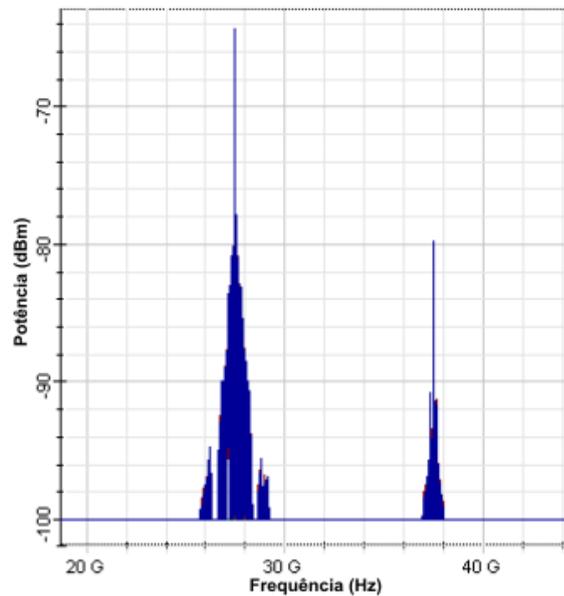


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Na Figura 37 é possível verificar o espectro do sinal elétrico após o fotodetector centrado em 1310 nm, sendo que depois da demodulação da portadora óptica no APD é possível verificar a presença das subportadoras de RF no espectro elétrico.

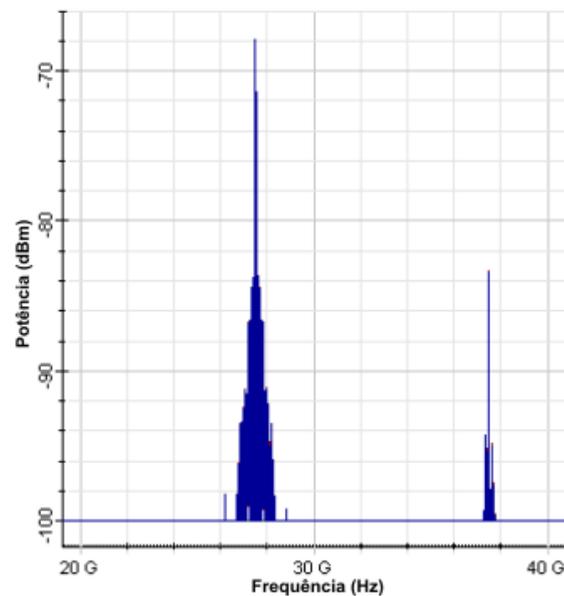
A Figura 38 mostra o espectro elétrico das subportadoras de RF após o primeiro *splitter*, enquanto a Figura 39 mostra o espectro elétrico após o segundo *splitter* mostrado no Apêndice D.

Figura 38 – Espectro elétrico após o primeiro *splitter* 1x2 no sentido de *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 39 – Espectro elétrico após o segundo *splitter* 1x2 no sentido de *uplink*.

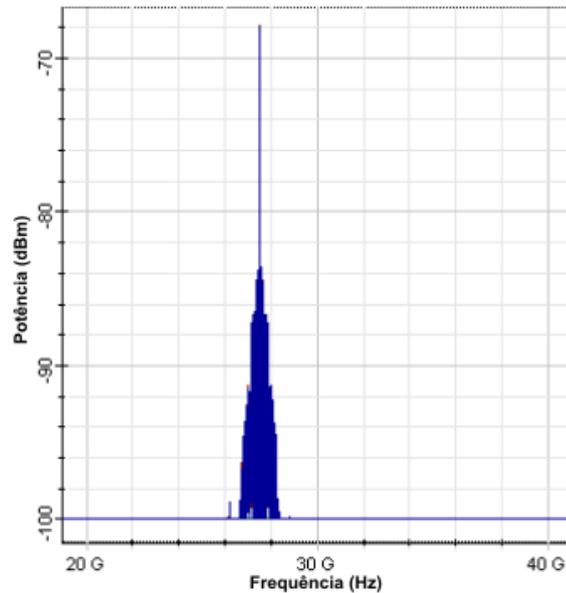


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Como mencionado anteriormente, após o *splitter* ocorre a atenuação do sinal devido às perdas de divisão e de inserção. Na Figura 38 verifica-se o mesmo sinal da Figura 37, porém atenuado em 3,6 dB, devido às perdas do dispositivo. Pelo mesmo motivo, na Figura 39 o sinal é atenuado em 3,6 dB em relação ao mostrado na Figura 38.

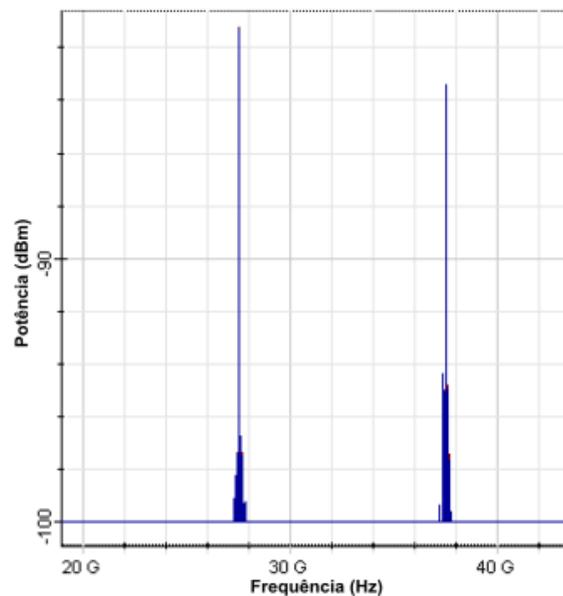
Como as duas subportadoras de RF foram transmitidas através da portadora óptica de 1310 nm, para recuperar as informações de cada subportadora, é utilizado o método de detecção mostrado na Figura 6. A Figura 40 mostra o espectro após o filtro passa-faixa de 27,5 GHz, assim como a Figura 41 mostra o espectro elétrico após o filtro de 37,5 GHz.

Figura 40 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 27,5 GHz no sentido de *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 41 – Espectro elétrico após o filtro passa-banda centrado em 37,5 GHz no sentido de *uplink*.

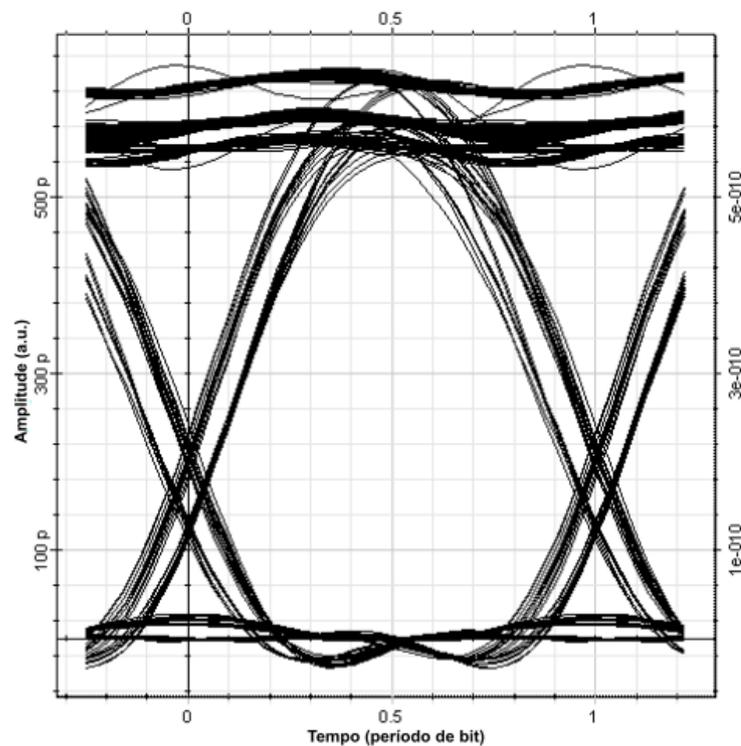


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através da Figura 40 é possível perceber que após o filtro centrado em 27,5 GHz, a subportadora de 37,5 GHz foi eliminada. No entanto, na Figura 41 verifica-se que mesmo após o filtro passa-faixa com frequência central de 37,5 GHz, há a presença da subportadora de 27,5 GHz. Assim como aconteceu no sentido de *downlink*, a largura de banda utilizada não foi estreita o suficiente para realizar a filtragem somente da subportadora de 37,5 GHz. Diante disso, foram realizados os mesmos testes de variação da taxa de transmissão para o canal de 37,5 GHz, obtendo-se resultados semelhantes aos encontrados no sentido de *downlink*. Com isto, sabe-se que, apesar da presença da subportadora de 27,5 GHz após o filtro passa-faixa, as informações que são mostradas no diagrama de olho da Figura 44 correspondem ao canal de 37,5 GHz.

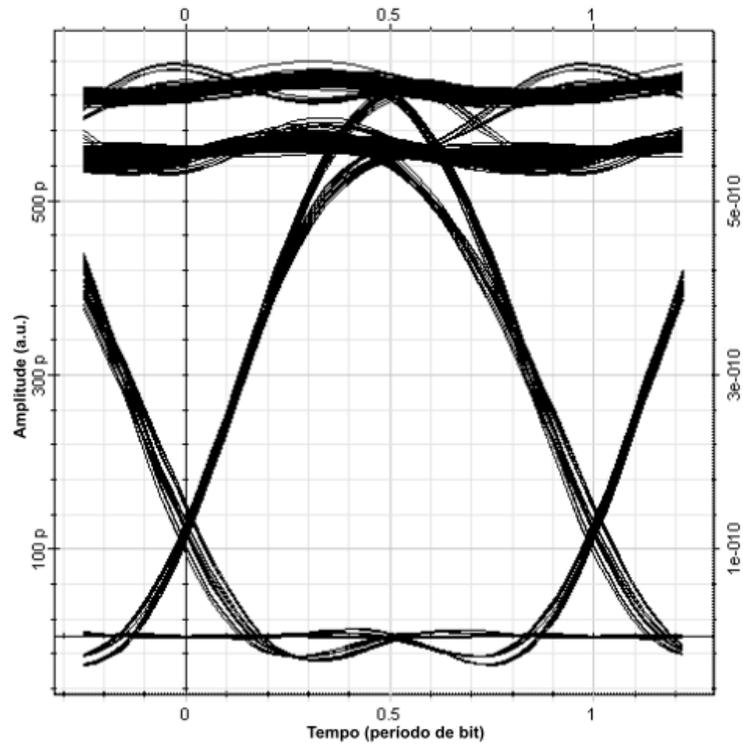
As Figuras 42 à 46 mostram os diagramas de olho obtidos referentes ao sentido de *uplink*.

Figura 42 – Diagrama de olho: primeiro *smart meter* no sentido de *uplink*.



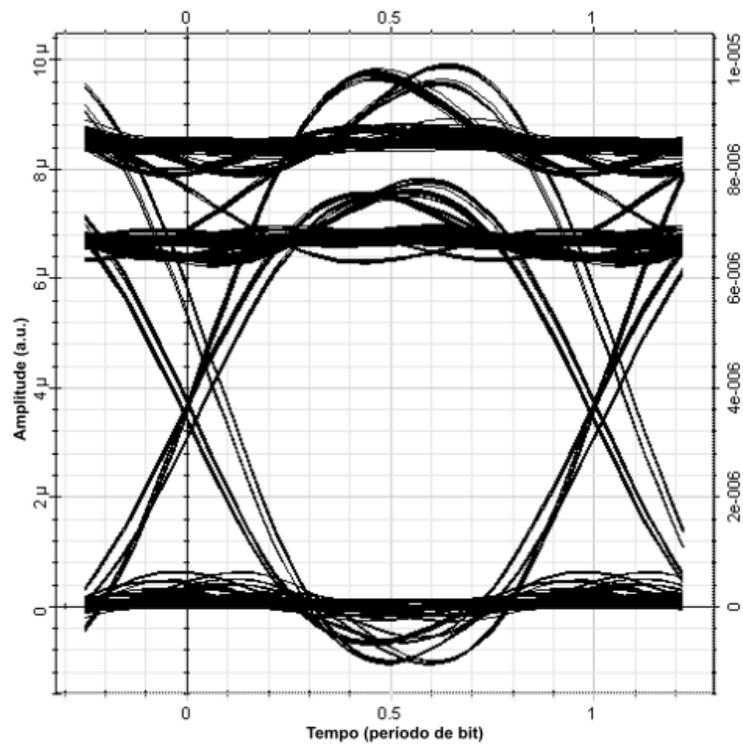
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 43 – Diagrama de olho: segundo *smart meter* no sentido de *uplink*.

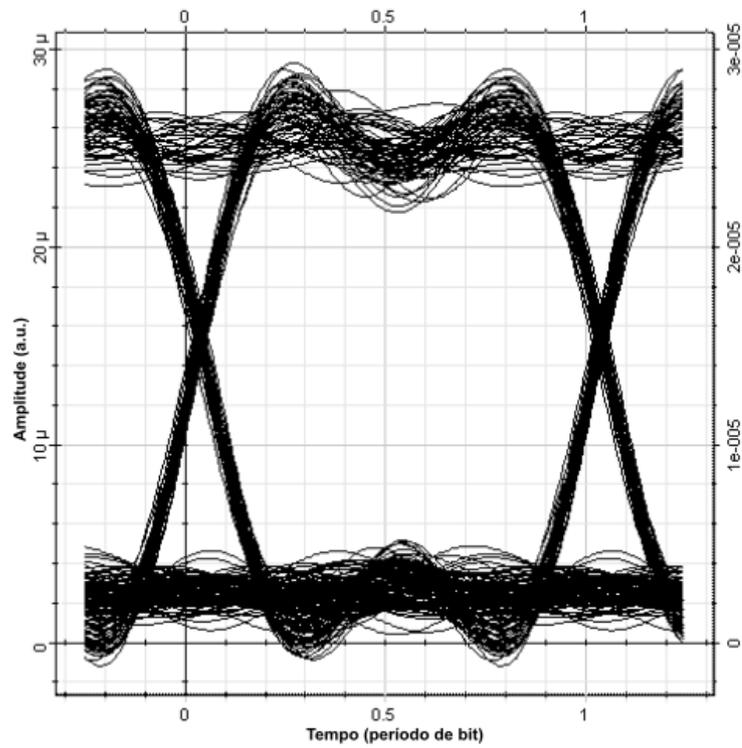


Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

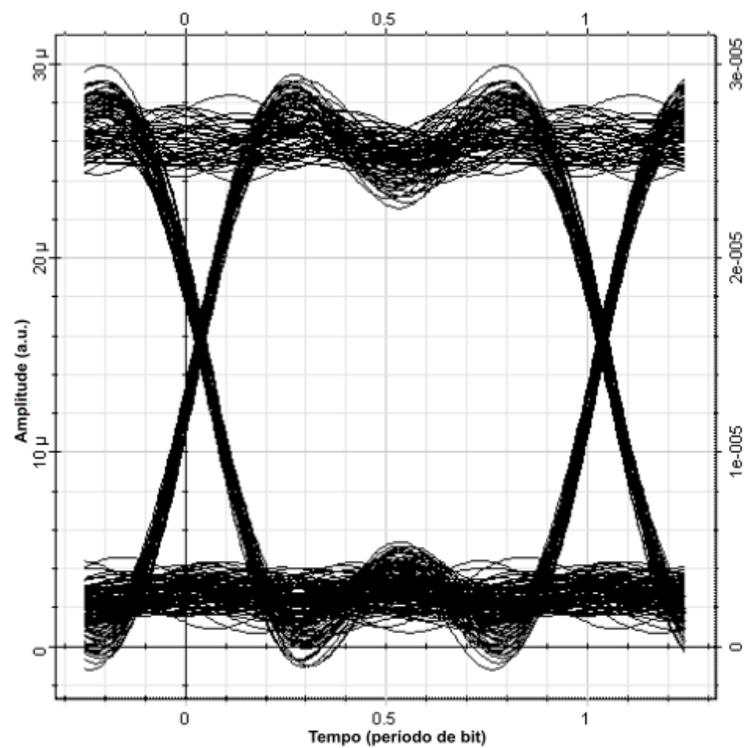
Figura 44 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1310nm - *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 45 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1330 nm - *uplink*.

Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 46 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1350 nm - *uplink*.

Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Através das Figuras 42 à 46, verifica-se que todos os diagramas de olho possuem uma grande abertura e uma pequena largura nos pontos de cruzamento, ou seja, os padrões de olho obtidos mostram, qualitativamente, o bom desempenho do sistema. A Tabela 5 apresenta as taxas de erro obtidas para cada diagrama de olho mostrado nas figuras anteriores, assim como o Fator Q.

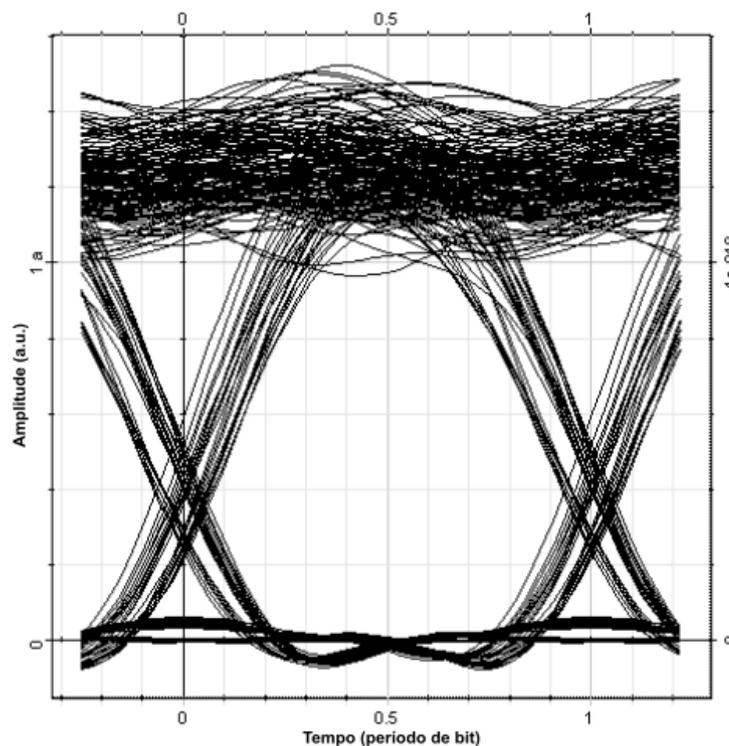
Tabela 5 – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados: *uplink*

<b>Figura</b>	<b>BER</b>	<b>Fator Q</b>
42	6,46e-92	20,22
43	2,03e-57	15,87
44	5,85e-16	7,91
45	5,48e-53	15,26
46	2,71e-60	16,33

Fonte: Autor.

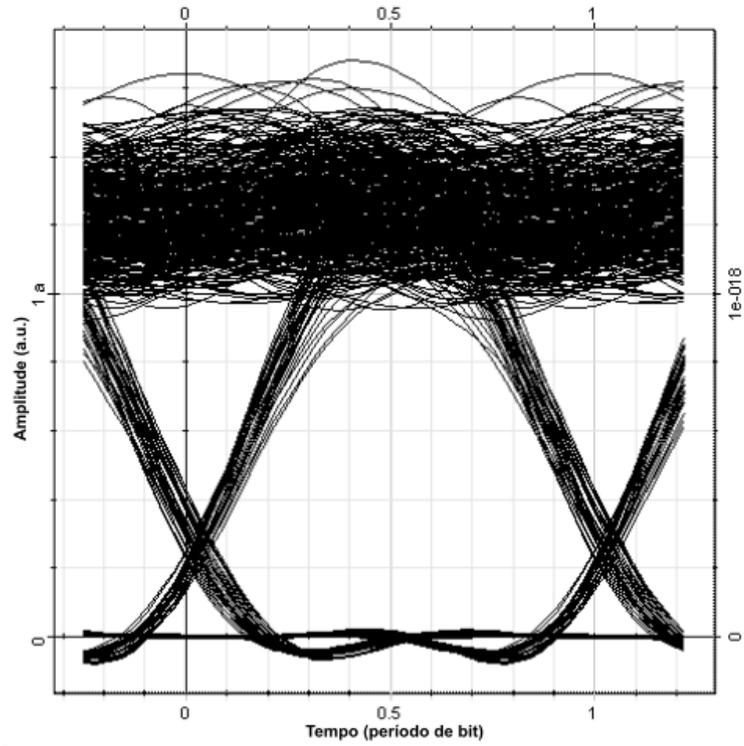
Os resultados mostrados na Tabela 5, informam que os requisitos em termos de taxa de erro de bit foram alcançados, pois as taxas apresentadas são menores que  $10^{-12}$ . No entanto, foi necessário o ajuste de potência de transmissão dos lasers usados no sentido de *uplink* devido às BER extremamente pequenas. As Figuras 47 à 51 mostram os diagramas de olho após os ajustes de potência do sistema.

Figura 47 – Diagrama de olho: primeiro *smart meter* com ajuste de potência - *uplink*.



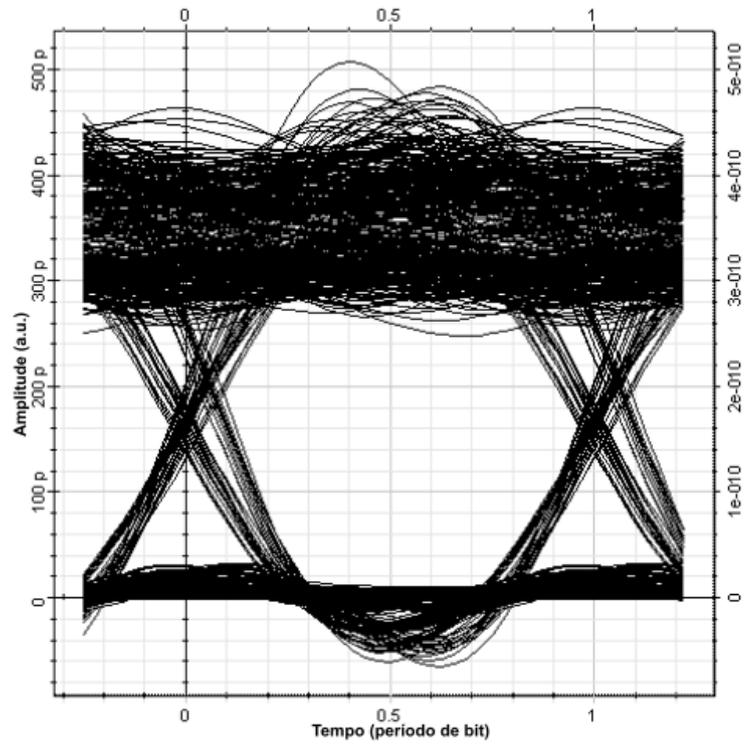
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 48 – Diagrama de olho: segundo *smart meter* com ajuste de potência - *uplink*.



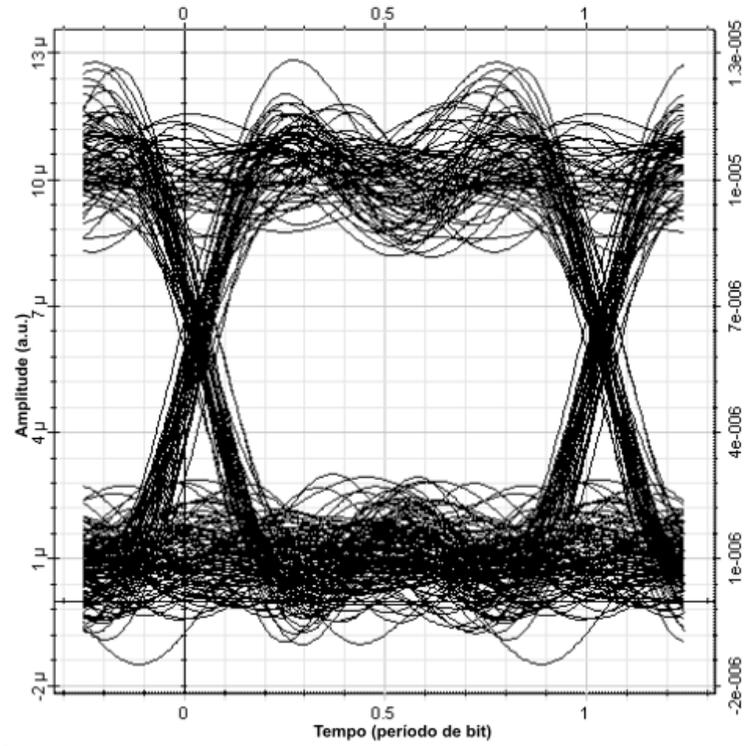
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 49 – Diagrama de olho: subportadora de RF de 37,5 GHz em 1310 nm, com ajuste de potência - *uplink*.



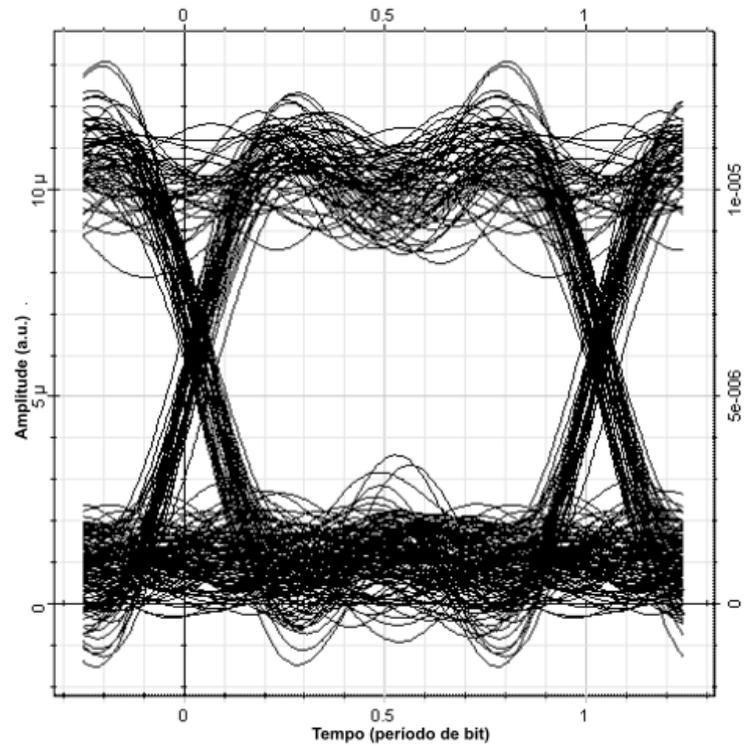
Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 50 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1330 nm, com ajuste de potência - *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Figura 51 – Diagrama de olho: portadora óptica em 1350 nm, com ajuste de potência - *uplink*.



Fonte: Simulação OptiSystem, 2016.

Para o sentido de *uplink* verifica-se que, após o ajuste de potência do sistema, os resultados obtidos apresentam uma boa capacidade de recuperação das informações transmitidas, comprovados pelos padrões de olho com grande abertura e pequena largura nos pontos de cruzamento. Essa mesma característica foi comprovada no sentido de *downlink*, ou seja, apesar da diminuição da potência de transmissão dos lasers, os resultados qualitativos mostram o bom desempenho do sistema.

A Tabela 6 mostra a BER e o fator Q para cada diagrama de olho obtido após os ajustes de potência.

Tabela 6 – Medição da BER e do Fator Q referentes aos diagramas de olho capturados com ajuste de potência: *uplink*

<b>Figura</b>	<b>BER</b>	<b>Fator Q</b>
47	1,37e-42	13,52
48	3,51e-24	9,99
49	8,37e-13	6,97
50	1,77e-12	6,94
51	1,17e-13	7,31

Fonte: Autor.

Assim como ocorreu para o sentido de *downlink*, a alteração da potência não resultou em valores de BER além do valor limite estipulado. Apenas para citar um exemplo, para a subportadora de RF de 37,5 GHz, ao variar a potência de 7,7 dBm à -14 dBm, a taxa de erro mudou de  $5,85 \times 10^{-16}$  para  $8,37 \times 10^{-13}$ .

Apesar de as taxas de erro para as Figuras 47 e 48 ainda serem muito pequenas, quando comparadas com as outras taxas obtidas, valores menores de potência de transmissão foram testados, mas resultaram em diagramas de olho fechados, o que indica o acerto do dimensionamento do sistema óptico proposto, ou seja, sem superdimensionamento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de diversos países do mundo já estudarem métodos de implementação das redes elétricas inteligentes, sendo que alguns até mesmo já possuem projetos em andamento nessa área, ainda há muitos desafios a serem enfrentados relacionados às *smart grids*, pois envolve diversas áreas que necessitam das mais avançadas tecnologias, tais como medição inteligente, segurança da rede, sistema de comunicação, gerenciamento dos dados, entre outros.

Diante disso, foi proposto um sistema de comunicação para as *smart grids*, especialmente entre os *smart meters* e a concessionária de energia, sendo utilizada uma rede óptica passiva para dar suporte ao tráfego agregado gerado pelas informações dos medidores de energia, assim como dos outros usuários que estarão utilizando a rede *wireless* 5G, sem que isso prejudique a qualidade de comunicação dos clientes da rede PON.

Foi possível testar a topologia proposta através de simulações no *software OptiSystem*, obtendo-se resultados de taxa de erro de bit dentro das especificações aceitas atualmente pela ITU-T para a homologação de sistemas ópticos comerciais, ou seja, BER próxima de  $10^{-12}$ , e diagramas de olho com grande abertura.

Outra característica da topologia proposta que merece destaque foi a combinação eficiente de diferentes técnicas de multiplexação: multiplexação WDM (3 portadoras ópticas multiplexadas em cada sentido de transmissão na mesma fibra), multiplexação FDM (das subportadoras de RF utilizadas para transportar os dados dos diferentes clientes da rede *wireless*) e multiplexação TDM (dos dados dos *smart meters* sob uma mesma subportadora de RF). O emprego eficiente destes diferentes tipos de multiplexação permitiu alcançar o máximo aproveitamento da banda-passante óptica disponível no canal óptico, o que amplia a capacidade de transmissão e maximiza a capacidade de atendimento aos usuários do sistema de comunicação.

Estas características demonstram que o sistema de comunicação proposto apresentou desempenho adequado inclusive para a transmissão de dados originados por outros dispositivos IoT de forma simultânea e sem prejuízo aos demais usuários, o que potencializa o seu emprego nas redes de comunicação atuais e futuras.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. *Internet das Coisas: Nós, as cidades, os robôs, os carros: Tudo conectado!*. Revista da Sociedade Brasileira de Computação. 2015. Citado na página 24.
- ANDREADOU, N. et al. *Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications*. MDPI. 2016. Citado na página 27.
- BERGER, L. T.; INIEWSKI K. *Redes Elétricas Inteligentes: aplicações, comunicação e segurança*. 1. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 26, 28, 33 e 37.
- BIKMETOV, R. et al. *Infrastructure and Applications of Internet of Things in Smart Grids: A Survey*. North American Power Symposium. 2017. Citado na página 25.
- CGEE. *Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional*. Brasília – DF, 2012. Citado na página 30.
- CHEN, X. et al. *Integration of IoT with Smart Grid*. International Conference on Communication Technology and Application. 2011. Citado na página 25.
- FERREIRA, R. L. *Redes Ópticas Passivas I: Multiplexação por Divisão no Tempo (TDM-PON)*. 2011. Disponível em: [https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva1/pagina\\_3.asp](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialropassiva1/pagina_3.asp). Citado na página 31.
- GHASEMPOUR, A. *Internet of Things in Smart Grid: Architecture, Applications, Services, Key Technologies, and Challenges*. MDPI. 2019. Citado na página 26.
- ITU-R. *Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s)*. 2017. Citado na página 38.
- JOHANN, C. D. *Nova Topologia de Rede Óptica Passiva para a Interface com as redes Wireless 5G*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pampa. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 40.
- KEISER, G. *Comunicações Por Fibras Ópticas*. 4. ed. – Porto Alegre: AMGH, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 24, 30, 31, 32 e 33.
- MOLLAH, M. B. et al. *Emerging Wireless Technologies for Internet of Things Applications: Opportunities and Challenges*. 2019. Citado na página 26.
- OSORIO ROMERO, C. A. *Avaliação do Desempenho de Rádio-sobre-fibra em um contexto de redes 5G*. Universidade Estadual de Campinas. 2018. Citado na página 34.

OU, Q. et al. *Application of Internet of Things in Smart Grid Power Transmission*. Third FTRA International Conference on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing. 2012. Citado na página 25.

SALEEM, Y. et al. *Internet of Things-aided Smart Grids: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions*. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

SCHRODER FILHO, H. G. *Os desafios das Redes Inteligentes de Energia Elétrica no Brasil e uma solução viável de Implementação*. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP, 2017. Citado na página 29.

SINHA, R. S. et al. *A Survey on LPWA Technology: LoRa and NB-IoT*. The Korean Institute of Communications and Information Sciences. 2017. Citado na página 38.

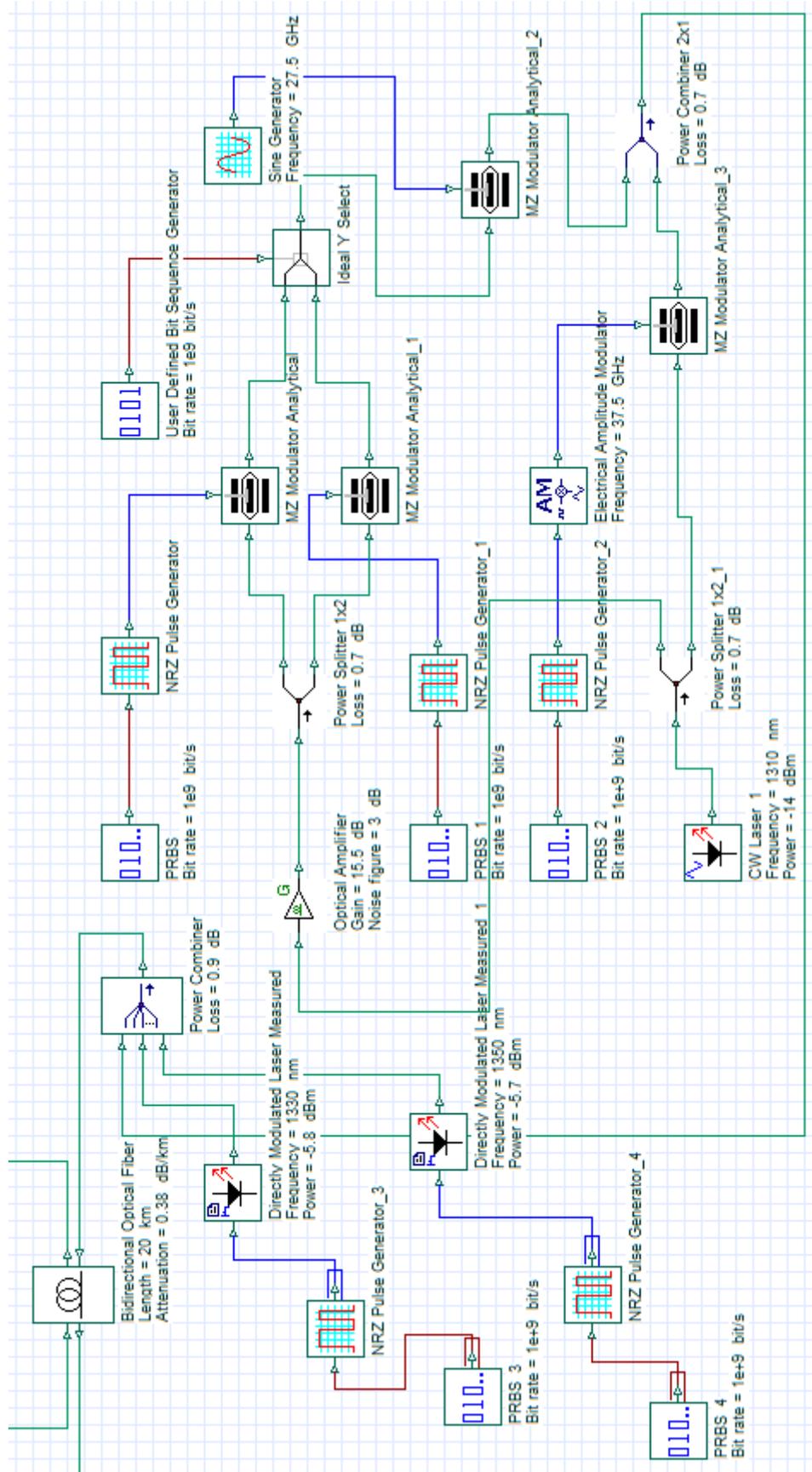
TOLEDO, F. *Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes*. Rio de Janeiro: Brasport, 2012. Citado na página 29.

WEG. *Módulo de Comunicação SMW – CI03SNDP - Guia de instalação, Configuração e Operação*. 2019. Citado na página 37.

ZHANG, J. et al. *Full-Duplex Quasi-Gapless Carrier-Aggregation Using FBMC in Centralized Radio-Over-Fiber Heterogeneous Networks*. Journal Lightwave Technology. 2017. Citado na página 33.





C – Topologia para a transmissão do sinal no sentido de *uplink*.

D – Topologia para a recepção do sinal no sentido de *uplink*.