

SISTEMA DE TRANSMISSÃO ÓPTICO TERRESTRE DE LONGA DISTÂNCIA SEM ESTAÇÕES DE REPETIÇÃO

Miriam Regina Xavier de Barros (1), João Batista Rosolem (1), Roberto Arradi (1), Sandro Marcelo Rossi (1), Antonio Amauri Juriollo (1), Jaime Alexandre (1), Eduardo Mabilon (1), Domingos Sávio dos Reis (2), Romel Domingues (2), Jose Vicente Fior (2), José Carlos Schumann de Melo (2), Renner Sousa Ferreira (2), Marcelo Barbosa (2)

(1) CPqD Telecom & IT Solutions, SP 340 km 118.5,
13086-902, Campinas, SP, Brazil
(2) Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A.

Resumo

Este artigo trata do desenvolvimento, pelo CPqD, de uma solução inovadora para sistemas de comunicação óptica de longa distância sem estações de repetição para a ELETRONORTE. O sistema desenvolvido tem alcance de até 400 km, taxa de modulação de 155 Mb/s e baseia-se na utilização de amplificadores ópticos bombeados remotamente, através das fibras do cabo OPGW. Estes amplificadores ópticos usam apenas componentes passivos, e podem ser acondicionados em bandejas de caixas de emenda ópticas, posicionadas nas torres de transmissão. As fontes para o bombeamento remoto são localizadas e alimentadas nas estações terminais. Neste trabalho descrevemos o projeto e os testes do sistema sem repetição. Os resultados dos testes mostraram taxas de erros de bit inferiores a 10^{-14} .

1. Introdução

Este trabalho relata uma solução inovadora para redução de custos relativos a implantação e manutenção de estações repetidoras em sistemas ópticos de longa distância da Eletronorte [1]. Esta solução consiste na substituição das estações repetidoras onde amplificadores ópticos alimentados eletricamente naquela estação, são substituídos por amplificadores passivos instalados em caixas de emenda óptica ao longo da linha de transmissão e alimentados opticamente pela própria fibra através de fontes remotas. A motivação para eliminar as estações repetidoras está associada ao fato de que a sua construção geralmente ocorre em locais de acesso difícil, tornando-se impossível durante a estação chuvosa do ano. Isto agrava os efeitos dos atos de vandalismo e das intempéries e se tornam um fator complicador para que estas repetidoras sejam não

assistidas. Em alguns casos não existe energia elétrica, o que obriga a construção de linhas de média tensão por dezenas de quilômetros em reservas demarcadas. O fornecimento de energia também não é confiável o que exige a instalação de sistemas alternativos. Devido à necessidade de refrigeração a alternativa mais utilizada é de grupos motor-gerador a diesel o que requer constante abastecimento e inspeção. Todos estes fatores elevam substancialmente os custos de implantação e operação destas repetidoras.

O projeto do sistema iniciado em dezembro de 2003 teve a duração de um ano, e consistiu de várias etapas, incluindo a escolha da melhor topologia sem repetição para os enlaces ópticos de Eletronorte. Após a escolha da topologia seguiram-se várias simulações computacionais visando a escolha dos melhores pontos de instalação dos amplificadores remotos. A partir de então foram desenvolvidos e adaptados os módulos que compõem o sistema sem repetição, tais como fontes de bombeio, amplificadores remotos e transponders. Todos estes equipamentos foram testados em laboratório através de ensaios sistêmicos, de alta potência óptica e de testes climáticos. Posteriormente a estes testes foi iniciado um teste de campo em Rondônia entre as localidades de Porto Velho e Abunã para validação nas condições reais de uso do sistema sem repetição. Os testes de operação do sistema em campo mostram excelente desempenho e foram monitorados remotamente, utilizando tecnologia de acesso Ethernet do CPqD. Nas seções a seguir, são descritas as etapas fundamentais deste projeto.

2. Dimensionamento do Sistema Óptico sem Repetição

Várias possibilidades tecnológicas foram abordadas, com o objetivo de conseguir a maior distância possível no enlace óptico. Entre estas tecnologias temos: amplificadores ópticos de potência e pré-amplificadores, amplificadores remotos, amplificadores Raman, fibras de sílica pura e artifícios ópticos e eletrônicos para supressão de efeitos não lineares e correção de erros. A topologia escolhida para a implementação prática do projeto, a qual descreveremos adiante, consiste no uso dos amplificadores remotos como elementos de extensão da distância. Para que esta alternativa fosse escolhida, os requisitos técnicos elaborados pela Eletronorte foram analisados. Os requisitos são:

- Distância entre estações = 400 km
- Taxa de transmissão = 155 Mb/s
- Atenuação da fibra convencional (STD) em 1550 nm = 0,22 dB/km
- Margem de operação do sistema = 4 dB

O produto do valor da distância pela atenuação de fibra, somado à margem de operação resulta em uma atenuação total de 92 dB, que é o valor mínimo que o sistema sem repetição deverá prover em termos de faixa dinâmica. Uma margem adicional eventualmente é necessária para cobrir possíveis penalidades na recepção devido à degradação da sensibilidade associada à presença de ruído dos amplificadores remotos, efeitos não lineares e dispersão cromática.

Em primeiro lugar optou-se pelo uso de um transmissor de potência elevada (> 8 dBm) com laser DFB operando em torno de 1558 nm ao invés do uso de um transmissor seguido de um amplificador de potência. Esta escolha, associada a uso de um amplificador remoto na transmissão, permite uma maior faixa dinâmica (28 dB) do que o amplificador de potência. Além disso, a potência de transmissão está limitada a valores em torno de +20 dBm que é o limiar de geração do efeito Brillouin, efeito não linear que degrada a qualidade de transmissão.

Em taxas de transmissão baixas, os receptores ópticos são bastante sensíveis, de tal forma que o uso conjugado de amplificação remota de recepção com receptor de alta sensibilidade dispensa o uso de amplificação Raman. Tal consideração não se aplica para taxas de transmissão superiores a 155 Mb/s. Há necessidade de se considerar também que, para o uso de amplificação remota, as fibras escolhidas para o enviar a potência de bombeio podem ser, no caso de recepção, a mesma fibra do sinal ou outras fibras do cabo inativas (fibras apagadas). Quando do uso da fibra de sinal para envio da potência de bombeio a

geração de amplificação Raman também ocorrerá, porém sem benefícios líquidos para o aumento da distância devido ao aumento da penalidade no receptor. No caso do lado da transmissão, não poderá ser utilizada a fibra de sinal para envio da potência de bombeio, devido à degradação da relação sinal-ruído proporcionado pela transferência do ruído de intensidade relativa do laser de bombeio para o sinal.

A possibilidade de uso de correção de erros na recepção foi descartada devido a pouca disponibilidade de componentes eletrônicos específicos para a realização desta função em baixas taxas de transmissão.

A topologia do sistema sem repetição escolhida é aquela mostrada na Figura 1(a). No caso, o transmissor é na realidade um transponder, que permite a entrada óptica de um sistema SDH. Na saída, um laser DFB em 1558 nm transmite o sinal para o enlace. O receptor também é um transponder com um fotodetector tipo APD de alta sensibilidade (-43 dBm) ou um pré-amplificador óptico seguido de receptor com fotodetector Pin e saída óptica para o sistema SDH.

A escolha do comprimento de onda em 1558 nm está associada ao fato de que a amplificação remota de recepção apresenta um pico de ganho centrado neste comprimento de onda. Esta característica é típica dos amplificadores a fibra de érbio que operam com níveis reduzidos de potência de bombeio (< 10 W).

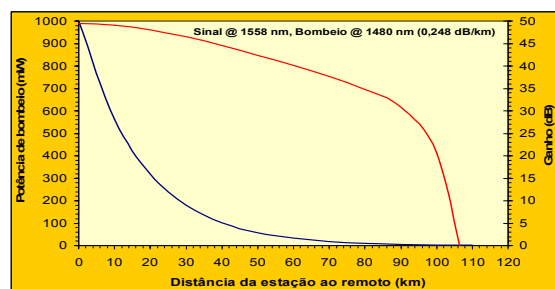
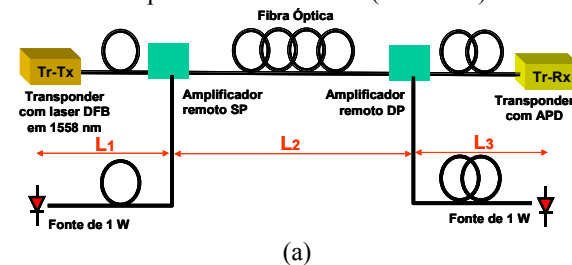


Figura 1. (a) Diagrama do sistema de transmissão sem repetição escolhido para a Eletronorte, onde L1 e L3 são as distâncias dos remotos até as estações terminais e L2 é a distância entre os remotos. (b) Gráfico da dependência da potência de bombeio e do ganho dos amplificadores remotos com a distância da estação.

Outra importante consideração a ser feita é relativa ao posicionamento dos amplificadores remotos. Devido às características sistêmicas distintas entre o lado de transmissão e recepção, a posição ótima dos amplificadores remotos não é simétrica relativa às estações terminais. No lado de transmissão a posição ótima é fortemente limitada pela geração de efeitos não lineares, entre eles o efeito Brillouin e a auto-modulação de fase [2]. Estes efeitos têm maior probabilidade de ocorrência quanto mais próximo da estação terminal estiver o amplificador remoto (Ver gráfico da Figura 1(b)) dado que a potência de bombeio é maior e, portanto será maior o ganho ou a potência de saída do amplificador. Por outro lado quanto mais distante da estação terminal, menor será a potência de bombeio que chegará ao mesmo, e, portanto, menor a potência de saída. Logo, existe um ponto ótimo para instalação do amplificador remoto de transmissão. Para o amplificador remoto de recepção, quanto mais distante da estação terminal, maior será a distância do enlace total conseguido, porém quanto mais distante da estação, menor será a potência de bombeio que chega ao amplificador remoto (Ver gráfico da Figura 1(b)) e portanto menor será o ganho. Existe também um ponto ótimo para instalação do amplificador remoto de recepção.

Um ponto importante também se relaciona com os valores de potência de entrada no amplificador remoto de recepção. Valores abaixo de -42 dBm comprometem significativamente o desempenho da taxa de erros do sistema devido a baixa relação sinal ruído apresentada. Os valores de potência de entrada do amplificador remoto de recepção têm dependência com a potência do amplificador remoto de transmissão e com a atenuação da fibra do segmento de enlace L2. Para obtenção dos pontos ótimos de instalação vários parâmetros sistêmicos devem ser avaliados simultaneamente, entre eles: as atenuações de bombeio e sinal, os ganho e as figura de ruído dos amplificadores remotos que variam com potência de sinal e de bombeio, a sensibilidade de recepção, a potência do transmissor, entre outros. Por outro lado os efeitos da dispersão cromática devem ser também avaliados. Na seção seguinte descreveremos os resultados da simulação computacional realizada para obtenção dos pontos ótimos dos amplificadores remotos, bem como do desempenho em termos de taxa de erro de bit do sistema.

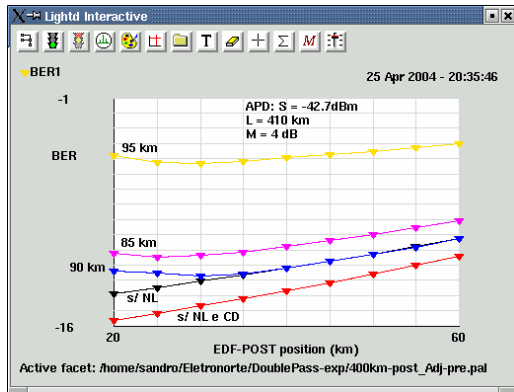
3. Simulações Computacionais

Inicialmente foi realizada a simulação computacional do circuito óptico dos amplificadores remotos passivos

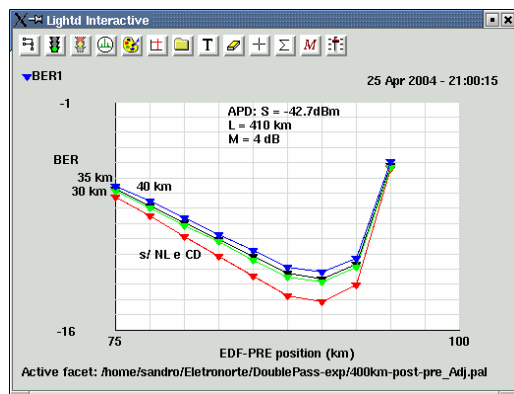
de transmissão e recepção. Para tanto foi utilizado o software de desenvolvimento de amplificadores a fibra dopada com érbio chamado OASIX. Neste contexto foram obtidos os parâmetros para a escolha dos componentes destes amplificadores. Entre estes parâmetros tem-se a potência de bombeio, o comprimento da fibra dopada, além do ganho e da figura de ruído. Foram utilizados na simulação três tipos de fibras dopadas com érbio disponíveis comercialmente, todas elas fornecidas pela empresa OFS. A escolha da configuração do circuito do amplificador tem forte influência no desempenho sistêmico. Para o amplificador remoto de transmissão, a configuração conhecida como bombeio copropagante de simples passagem foi adotada, enquanto que para o amplificador remoto de recepção foi adotada a configuração conhecida como bombeio copropagante de dupla passagem. Enquanto a primeira configuração é a tradicionalmente usada em circuitos de amplificação óptica, a segunda representa uma inovação para o uso em sistemas sem repetição. Esta configuração proporciona maiores ganhos quando baixas potências de bombeio são utilizadas. Na transmissão o ganho do amplificador remoto foi de 18 dB e na recepção foi de 32 dB para 1558 nm.

As simulações sistêmicas foram feitas com o software Light-D, desenvolvido no CPqD. Foram realizadas simulações usando os dados de atenuação medidos em campo pela equipe do CPqD no enlace Porto Velho-Abunã. A atenuação usada no comprimento de onda (1480 nm) do bombeio foi de 0,245 dB/km, e a atenuação usada no comprimento de onda (1550 nm) de sinal foi de 0,22 dB/km. A Figura 2(a) mostra os resultados da simulação para o remoto de transmissão e a Figura 2(b) para o remoto de recepção. A curva vermelha é de referência e não considera efeitos não lineares no sistema e nem compensação de dispersão. A curva preta é também de referência e não considera efeitos não lineares no sistema.

A localização dos amplificadores remotos foi otimizada para obtenção da menor taxa de erros possível. As distâncias até a transmissão e recepção obtidas foram de 30 e 90 km, respectivamente para transmissão e recepção. O alcance total obtido foi de 410 km, com margem de potência de 4 dB. A taxa de erros nesta condição foi de 10^{-13} . Reduzindo-se o alcance para 400 km, a margem sobe para 9 dB e a taxa de erros reduz para 10^{-15} . Estes valores permitiram prever um bom desempenho sistêmico para o sistema sem repetição da ELETRONORTE.



(a)



(b)

Figura 2 – Resultados da simulação computacional sistêmica para o sistema sem repetição (a) posicionamento do amplificador remoto de transmissão e (b) posicionamento do amplificador remoto de recepção.

4. Tecnologias do sistema óptico sem repetição

Nesta seção descrevemos com mais detalhes as tecnologias dos elementos principais que compõem o sistema sem repetição. Os subsistemas principais são fonte de bombeio para 1480 nm, amplificadores remotos e o transponder bidirecional.

4.1 Fontes de Bombeio

A fonte de bombeio consiste no arranjo de 4 lasers, cada um com potência máxima de 360 mW. Dois lasers operando no comprimento de onda de 1470 nm são multiplexados por polarização ortogonal. O mesmo se dá com outros dois lasers de 1488 nm. Os quatro feixes ópticos são posteriormente multiplexados em comprimento de onda para obter uma saída única com uma potência máxima da ordem de 1,2 W. A Figura 3(a) mostra uma foto da montagem óptica da fonte de bombeio.

4.2 Amplificadores remotos

Conforme mencionado anteriormente, dois tipos de circuitos de amplificação foram utilizados. A configuração utilizada no amplificador remoto de transmissão é a configuração conhecida como bombeio copropagante de simples passagem que utiliza um multiplexador de bombeio, um certo comprimento de fibra dopada e um isolador de saída. Para o amplificador remoto de recepção foi adotada a configuração copropagante de dupla passagem que é constituída de um multiplexador de bombeio, um certo comprimento de fibra dopada, um espelho de rotação de Faraday e um circulador para entrada e saída. Para instalação, os amplificadores remotos foram adaptados em estojos das caixas de emendas dos cabos OPGW conforme mostra a Figura 3(b).

4.3 Transponder

Os transponders são elementos que convertem um sinal óptico de entrada com ampla faixa de características espectrais e potência para uma saída com características espectrais e potências desejadas. Foi desenvolvido um transponder bidirecional, ou seja, com transmissão e recepção integradas (Figura 3(c)). O mesmo foi projetado para uso em 155 Mb/s com as seguintes características:

4.3.1 Transmissão

Potência de entrada: 0 a -38 dBm; fotodetector PIN;
 Faixa espectral de entrada: 1100 a 1600 nm;
 Potência de saída: 8 dBm;
 Espectro de saída: 1558 nm, largura de linha a -3 dB com modulação direta = 0,44 nm, laser DFB.

4.3.2 Recepção

Fotodetector APD com filtro óptico de 0,8 nm
 Sensibilidade a BER = 10^{-12} = -43 dBm;
 Potência de saída: -11 dBm;
 Espectro de saída: 1300 nm, largura de linha a -3 dB com modulação direta = 4 nm, laser FP.
 Pré-amplificador
 Sensibilidade a BER = 10^{-12} = -46 dBm;
 Potência de saída: -11 dBm;
 Espectro de saída: 1558 nm com filtro óptico de 0,8 nm.

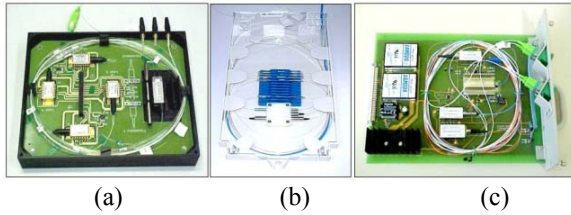
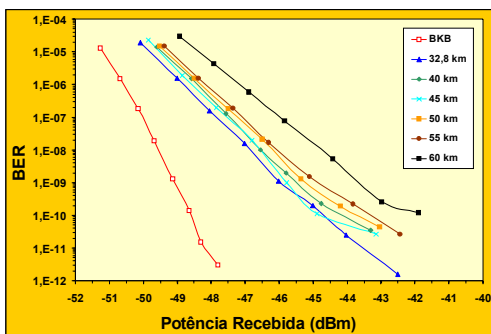


Figura 3 – (a) Fonte de bombeio, (b) Amplificador remoto no estojo de emenda e (c) Transponder bidirecional.

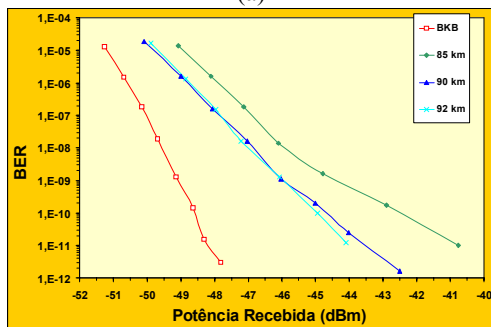
5. Testes Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais visam validar os resultados obtidos na simulação quanto à posição ótima dos amplificadores remotos e verificar o desempenho do sistema em termos de taxa de erro de bit (BER) e garantir a não ocorrência de efeitos não lineares.

Foi montado um enlace protótipo, com comprimentos dos segmentos dos enlaces L1, L2 e L3 com atenuação levemente abaixo das atenuações dos enlaces previstos na simulação. Atenuadores ópticos posicionados em pontos estratégicos do enlace permitiram a variação da atenuação para a verificação do desempenho sistêmico para comprimentos acima e abaixo daqueles determinados na simulação computacional. Os resultados são mostrados na Figuras 4(a) e (b).



(a)



(b)

Figura 4 – (a) Curva de taxa de erro de bit pela potência recebida para vários comprimentos do segmento L1 e (b) curva de taxa de erro de bit pela potência recebida para vários comprimentos do segmento L3.

Comprovou-se que os valores de distância L1 » 30 km e L3 » 90 km obtidos na simulação eram os comprimentos ótimos.

O desempenho em taxa de erro de bit do sistema com uma distância total de 410 km, mostrou-se bastante próximo ao previsto na simulação, tanto no que diz respeito às relações sinal/ruído quanto às taxas de erros. Além das variações de distâncias dos amplificadores remotos, foi avaliado o desempenho do sistema variando-se, independentemente, a potência de bombeio do amplificador remoto de recepção, a potência de bombeio do amplificador remoto de transmissão, a potência de sinal na entrada do amplificador remoto de recepção e a potência de sinal na entrada do amplificador remoto de transmissão. Para todos estes estudos, os resultados obtidos estão muito próximos aos obtidos nas simulações.

6. Testes de validação em campo

No final de setembro de 2004 foi iniciado o teste de campo do sistema sem repetição entre Porto Velho e Abunã em Rondônia, com intuito de validar o desempenho do sistema em condições reais de funcionamento. O comprimento do enlace é de 196 km e um loop óptico com atenuador, foi feito na estação de Abunã para que o sinal retornasse a Porto Velho completando uma distância total de 400 km.

Inicialmente foram realizadas novas medidas de atenuação óptica das fibras selecionadas do cabo usando OTDR. Em seguida, foi instalado o sub-bastidor contendo as fontes de bombeio, o transponder bi-direcional, o pré-amplificador, a fonte de alimentação e a placa de supervisão e controle no bastidor da sub-estação de Porto Velho da Eletronorte. O bastidor abriga entre outros equipamentos, um distribuidor geral óptico (DGO) do cabo OPGW da linha de transmissão Porto Velho/Abunã. Após a instalação do sub-bastidor foram feitas as fusões das fibras destinadas às saídas das fontes de bombeio de transmissão e de recepção respectivamente. Em seguida foram realizados testes preliminares para verificação do perfeito funcionamento dos equipamentos instalados (Figura 7(a)). Após a montagem e testes preliminares dos equipamentos realizados na estação de Porto Velho, procedeu-se às instalações dos amplificadores remotos, inicialmente o de transmissão na torre 79 e em seguida o de recepção na torre 224 (Figura 7(b)), localizadas a 30,923 km e 88,757 km respectivamente da estação de Porto Velho. Com a preparação de toda a infra-estrutura para a instalação do amplificador executada, a caixa de emenda foi rebaixada, aberta e as emendas unindo as fibras das unidades básicas número dois foram desfeitas. Em seguida as duas unidades básicas foram

derivadas para a bandeja do amplificador e executadas as emendas necessárias. Em seguida a caixa de emenda foi reerguida e novamente instalada na torre de transmissão (Figura 7(c)). Testes dos níveis de potência de sinal e bombeio foram feitos em cada etapa de instalação.

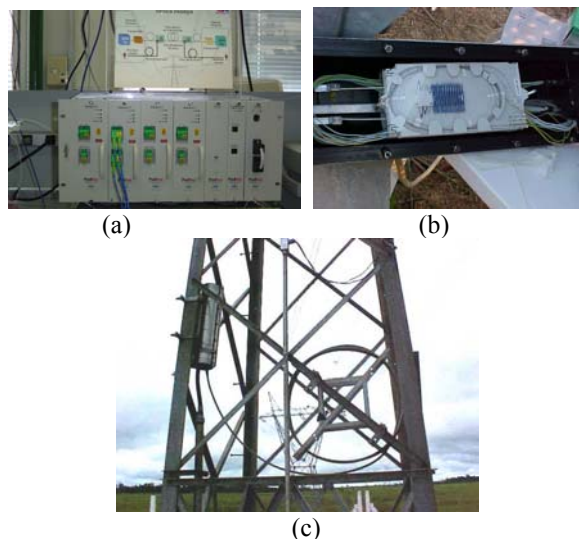


Figura 5 – (a) Sub-bastidor contendo as fontes de bombeio, o transponder bi-direcional, o pré-amplificador a fonte de alimentação e a placa de supervisão e controle na sub-estação Porto Velho, (b) Instalação do amplificador remoto na caixa de emenda óptica e (c) Caixa de emenda óptica com amplificador remoto instalada na torre de transmissão.

Os testes remotos foram feitos a partir do laboratório de sistemas de comunicações ópticas do CPqD, usando um canal de comunicação via Ethernet, entre um computador do CPqD e a rede de computadores da Eletronorte, em Brasília. O controle e a monitoração remotos dos módulos são feitos usando uma placa de hardware e um software desenvolvidos no CPqD e adaptados para esta finalidade. O desempenho do sistema foi monitorado remotamente, através da medida da taxa de erros do sistema. Neste caso, utiliza-se o software de controle do próprio instrumento de medidas de taxa de erros. Ambos os softwares estão instalados no computador da Eletronorte em Brasília e são acessados remotamente do CPqD. A taxa de erros foi monitorada diariamente, durante três meses e neste período, observou-se ausência de erros de bit, o que indica que a taxa de erros de bit é inferior a 10^{-14} , para a taxa de modulação de 155 Mb/s.

7. Conclusão

O CPqD desenvolveu para a Eletronorte uma solução inovadora para sistema de comunicação óptica

de longa distância sem estações de repetição ao longo do trecho. A solução, com alcance de até 400 km, visa possibilitar a comunicação entre estações da companhia nas regiões de difícil acesso. Nestas regiões, a construção, alimentação e manutenção de estações repetidoras para recuperação do nível do sinal óptico são tarefas de alta complexidade e apresentam um custo muito elevado. Portanto, a eliminação dessas estações possibilita uma grande redução dos custos dos sistemas de telecomunicações de supervisão e controle da rede elétrica.

O sistema desenvolvido pelo CPqD, com vistas à imediata transferência de tecnologia para a indústria, baseia-se na utilização de amplificadores ópticos bombeados remotamente, através das fibras do cabo, tanto a partir da estação de transmissão quanto da estação de recepção. Estes amplificadores ópticos são montados usando apenas componentes passivos, de modo que apresentam funcionamento e desempenho pouco dependentes de condições ambientais e podem ser acondicionados em bandejas de caixas de emenda convencionais, posicionadas nas torres de transmissão. As fontes para o bombeamento remoto são localizadas e alimentadas nas estações terminais. Os testes de operação do sistema em campo, realizados no cabo OPGW da empresa instalado entre Porto Velho e Abunã, em Rondônia, mostram excelente desempenho, e foram monitorados remotamente no CPqD, em tempo real, utilizando tecnologia de acesso Ethernet.

8. Referências Bibliográficas

- (1) Reis, D. S. D., Domingues, R., Barros, M. R. X., Rosolem, J. B., “Amplificadores ópticos passivos a fibra dopada com érbio e bombeamento remoto”, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, SNPTEE, Uberlândia, 2003.
- (2) Rosolem, J. B., Barros, M. R. X., Rossi, S. M., Juriollo, A. A.; Rocha, M. L., Benayon, F. R. B., Pereira, F., “Limites de Potência Transmitida em Sistemas Ópticos sem Repetição”, X Simpósio da SBMO, 2002, Recife.
- (3) Ridgway, D.N, “Effects of Higher Power Levels on Optical Connectors, Splices, and Related Components”, National Fiber Optic Engineers Conference – NFOEC 2001, p561-572, 2001.
- (4) Seo, K., Iwaya, M., Shiino, M., Tanaka, K., “Development of High-Power Stable PLC-Type Pump Combiner”, Furukawa Review, Furukawa Review, n. 23, p48-52, 2003.