



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

A TECNOLOGIA ÓPTICA APLICADA NO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

**FABIO RENATO BASSAN (1); JOÃO BATISTA ROSOLEM (1); BRUNO NOGUEIRA AIRES (1); RODRIGO PERES (1); CLAUDIO FLORIDIA (1); CARLOS ALEXANDRE MEIRELES DO NASCIMENTO (2); JAVIER APREA (3); FABIANO FRUETT (4).
CPQD (1); CEMIG (2); IMS - SOLUCOES EM ENERGIA LTDA (3); UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS(4)**

RESUMO

Este informe técnico apresenta um novo sensor óptico, para medição de tensão e corrente, aplicado em qualidade de energia elétrica baseado na tecnologia PoF (Power over Fiber), onde o laser no núcleo da fibra óptica é convertido em energia elétrica. Esse sensor óptico foi desenvolvido para ser aplicado em redes de distribuição de média tensão até 23,0 kV. Este trabalho, também apresenta resultados de testes de campo do sensor alimentado por fibra óptica em uma rede de distribuição que utiliza cabos condutores com fibras ópticas integradas (Rede Sinérgica) de 13,8 kV, conduzido no campus da UniverCemig em Sete Lagoas, Minas Gerais.

PALAVRAS-CHAVE

LPIT; Low-Power-Instrument-Transformer; Power-over-Fiber; Rede Sinérgica; Fibra Óptica.

1.0 INTRODUÇÃO

Os sensores aplicados às redes de energia elétrica são elementos relevantes que fornecem monitoramento, proteção e controle em tempo real da rede de energia elétrica [1-2]. Parâmetros elétricos típicos medidos por esses sensores incluem tensão, corrente, fluxo de energia e outras grandezas elétricas de qualidade de energia elétrica (QEE), como subtensões, sobre tensões, harmônicos de tensão e corrente, porcentagem de distorção harmônica e distorção harmônica total. Basicamente duas tecnologias de sensores de tensão e corrente foram desenvolvidos para serem utilizados em sistemas de potência: os baseados em dispositivos eletrônicos e os baseados em dispositivos puramente ópticos.

Normalmente os sensores baseados em dispositivos eletrônicos [3] coletam energia do próprio condutor de energia (armazenando energia em baterias ou supercapacitores) e a transmissão de dados é sem fio, por meio de protocolos de comunicação adequados. Para dispositivos ópticos, não há necessidade de alimentação elétrica seja por meio de cabos metálicos e/ou baterias internas, e a transmissão de dados é feita pelas fibras ópticas.

Os sensores baseados em dispositivos eletrônicos e transmissão de dados sem fio requerem uma potência relativamente alta, o que restringe a transmissão de dados em tempo real. Além disso, a captação de energia do cabo condutor depende da presença de tensão ou corrente no condutor de energia elétrica onde a medição é realizada.

Os sensores baseados em dispositivos puramente ópticos [4-5] possuem alta dependência, ou elevada sensibilidade em relação à variação da temperatura ambiente, o que diminui seu desempenho principalmente em medições de qualidade de energia elétrica onde a estabilidade, exatidão e precisão das medições de tensão e corrente são fundamentais. Com o desenvolvimento de técnicas e tecnologias específicas os sensores ópticos estão conseguindo superar suas limitações em relação às tecnologias convencionais.

Além disso, a tecnologia de fibra óptica vem sendo introduzida gradualmente em muitas partes das instalações elétricas. É reconhecido pelos especialistas da indústria de energia que a fibra óptica será o próximo grande passo na digitalização da rede elétrica. A fibra óptica além de ser uma opção para a transmissão de dados dos sensores baseados em dispositivos eletrônicos, também pode ser utilizada como alternativa de alimentação para essa tecnologia de sensores por meio da técnica de alimentação por fibra óptica, do inglês *Power over Fiber* (PoF). Este modelo de sensoriamento aliado ao conceito de integração entre as redes de fibras ópticas e de distribuição de energia elétrica (Rede Sinérgica) [6] pode trazer outros benefícios, como suporte a serviços de telecomunicações

de banda larga e sensoriamento amplo e passivo das duas redes integradas, como ainda não imaginado por meio das redes sem fios.

Este trabalho apresenta um novo sensor de tensão e corrente, aplicado a medições de qualidade de energia elétrica que visa superar as desvantagens apresentadas pelas tecnologias convencionais de mercado, como a medição de parâmetros independente do nível de corrente conduzida no cabo, baixa suportabilidade a descargas atmosféricas, e influência da vibração, posição e temperatura na medição. O sensor óptico atende aos critérios de precisão da IEC 61869-10 e IEC 61869-11 para corrente e tensão e, além disso, atende aos critérios práticos adotados por empresas do setor elétrico [7-8], incluindo medições de tensão sem remover o revestimento dos cabos condutores cobertos e medições de corrente sem desligamento das cargas, o que é uma grande evolução para melhorar os indicadores de continuidade das empresas de distribuição de energia elétrica. Este sensor óptico é baseado na tecnologia PoF e foi desenvolvido para ser aplicado em tensões que variam de 80% a 120% dos valores nominais fase-terra de 6,87 kV, 7,97 kV e 13,28 kV (respectivamente redes de 11,9 kV, 13,8 kV e 23,0 kV fase-fase), e em duas faixas de corrente 1,25-30 A e 30-900 A. Outra grande vantagem da tecnologia de sensoriamento óptico é a facilidade de escalabilidade do sensor em diversos níveis de tensão e de corrente.

Este trabalho também apresenta os resultados de testes de campo utilizando o sensor alimentado eletricamente pela conversão do laser da fibra óptica, usado para medir corrente e tensão em aplicações de qualidade de energia elétrica (QEE). O sensor de corrente e tensão baseado em PoF foi testado com funções de alimentação, medição e transmissão de dados realizadas simultaneamente em uma rede de distribuição híbrida contendo cabos condutores com fibras ópticas integradas (Rede Sinérgica) de 13,8 kV. O experimento foi conduzido em uma instalação experimental no campus da UniverCemig em Sete Lagoas, Minas Gerais [9].

2.0 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTE E TENSÃO BASEADO EM POF

A Figura 1(a) mostra o diagrama de instalação do sensor de corrente e tensão baseado em PoF no condutor de média tensão (em apenas uma fase para simplificar sua representação). Além do cabo óptico, um cabo elétrico de referência está conectando o sensor ao fio terra ou neutro e este cabo é necessário para fornecer maior precisão para as medições de tensão, além de ser um elemento de segurança para as descargas atmosféricas ou ruptura de dielétrico. O sistema de medição é composto basicamente por duas partes: o sensor e a unidade de processamento dos sinais. O sensor é conectado ao condutor de média tensão e realiza a medição de tensão, corrente e temperatura. A unidade do sensor é usada para adquirir, digitalizar e enviar dados para a unidade de processamento. A unidade de processamento dos sinais é usada para alimentar o sensor, receber, processar e analisar os dados de tensão, corrente e temperatura.

Um diagrama do sensor óptico PoF é mostrado na Figura 1(b). Na parte inferior, é mostrada a unidade de processamento que é composta por um laser de alta potência (Laser PoF) em conjunto com a unidade de recepção óptica (Rx Data e RX Clock), que recebe os sinais do sensor. Três fibras ópticas conectam a unidade de processamento ao sensor. No sensor, um conversor fotovoltaico (PVC) recebe a potência transmitida pelo Laser PoF. A energia elétrica produzida pelo conversor fotovoltaico é usada para alimentar lasers de baixo limiar, circuitos eletrônicos e os sensores (corrente, tensão e temperatura) usados nesta unidade.

Em uma aplicação padrão, a unidade de processamento é instalada dentro de um gabinete na parte inferior do poste e os dados são transmitidos para uma sala de controle usando GPRS ou qualquer outro meio de comunicação disponível. Na aplicação avançada (ver seção 4), a unidade de processamento pode ser instalada, por exemplo, em uma sala de controle dentro de uma subestação, e o sinal pode ser transmitido para a sala de controle por meio de fibras ópticas disponíveis na rede de distribuição de energia elétrica.

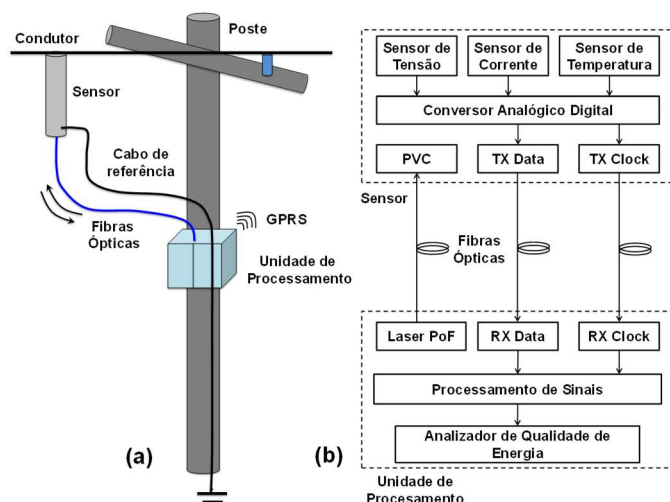


Figura 1-(a) Instalação básica do sistema de medição de corrente e tensão usando PoF - (b) diagrama de blocos do sistema.

2.1. Sensor

A Figura 2(a) mostra uma visão 3D do sensor. O sensor é composto das seguintes partes: cabeça, capacitor e isolador. A cabeça do sensor contém todos os circuitos eletrônicos para medições e processamento de sinal, mecanismo de grampo, suporte estrutural e uma carcaça de proteção. O isolador é utilizado para isolar a média tensão do potencial de terra e ao mesmo tempo, possui um capacitor estrutural (C2) que forma um divisor de tensão capacitivo com o capacitor C1 colocado na placa eletrônica do sensor. O sensor foi projetado para permitir a instalação usando uma vara de manobra convencional, a cabeça do sensor possui um parafuso tipo olhal usado para prender, transportar e conectar a unidade do sensor ao condutor de média tensão. Os cabos ópticos e de aterramento são conectados à unidade do sensor na parte inferior do isolador.

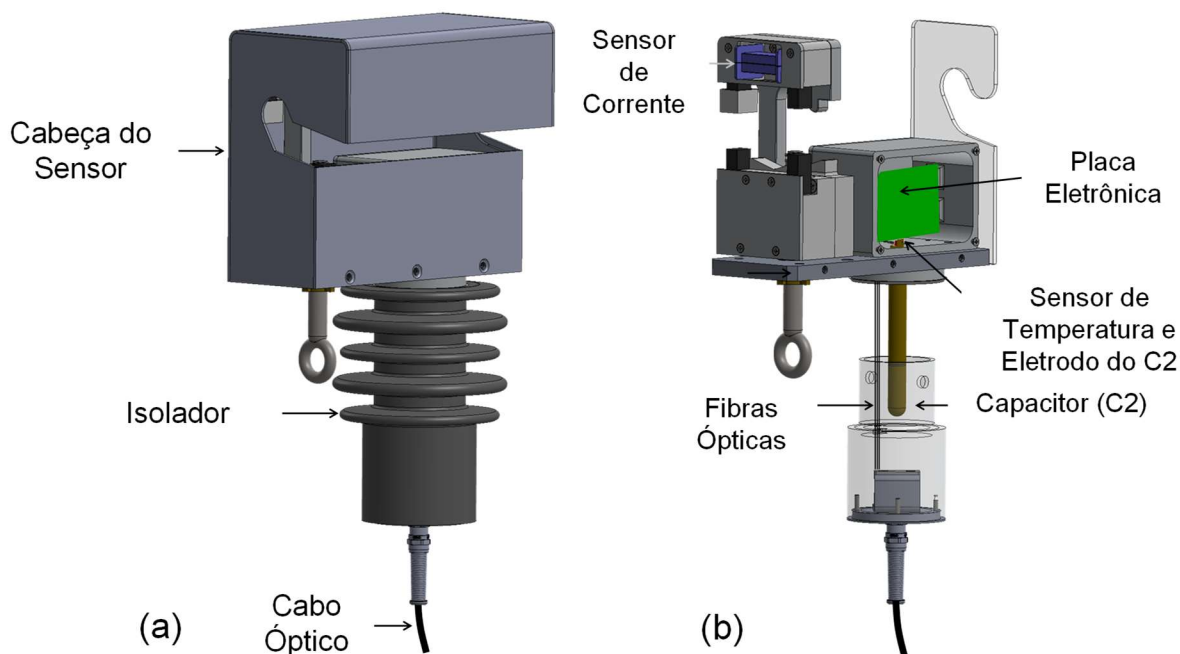


Figura 2-(a) Principais partes do sensor -(b) sensor sem a tampa de proteção mostrando: sensor de corrente, mecanismo de travamento, placa eletrônica, fibras ópticas e o capacitor C2 mostrado sem a camada de isolamento.

A alimentação elétrica e a comunicação de dados entre o sensor e a unidade de processamento são realizadas por meio de três fibras ópticas multimodo de 62,5 / 125 μm , que garantem o alto isolamento elétrico entre a média tensão e o aterramento. O caminho de alimentação elétrica é composto por um laser de alta potência (PoF Laser), colocado na unidade de processamento, um cabo de fibra óptica robusto e um

conversor foto voltaico PVC, colocado na unidade do sensor. O caminho de dados (data e clock) é realizado por outros dois lasers de baixa potência e baixo custo, que são colocados na unidade do sensor. Um laser é usado para a transmissão do relógio e o outro é usado para o sinal de dados. O microcontrolador aciona cada laser diretamente usando um resistor de polarização. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos do sensor.

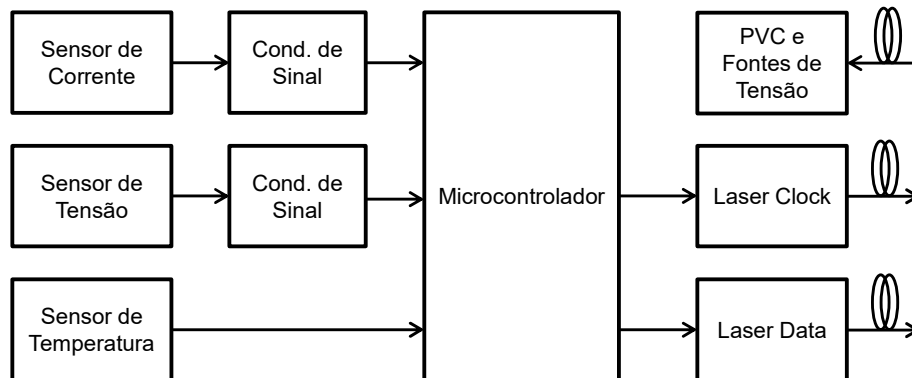


Figura 3-Diagrama de blocos do sensor.

A média tensão a ser medida é aplicada em um terminal C1 e a referência de aterramento é aplicada em um terminal C2. O valor de C1 é escolhido para garantir baixa tensão sobre C1 (até 2Vpp) e a alta tensão restante é aplicada em C2. A medição da tensão é realizada em C1. O capacitor C1 foi escolhido para minimizar o efeito da temperatura na medição. Para proteger o sensor de danos de descargas atmosféricas, o sistema de medição de tensão do sensor foi projetado para suportar um nível de isolamento básico (BIL) de 400 kV. Em relação à estrutura do isolador o nível de isolamento básico (BIL) é 396 kV. Esses valores de nível de isolamento básico (BIL) são maiores do que os recomendados pelos padrões.

O sensor foi projetado para ser instalado em linhas de transmissão e/ou redes de distribuição de energia elétrica, expostas às condições climáticas. Para manter a precisão do sensor na faixa de temperatura, um sensor de temperatura microeletrônico foi instalado na cabeça do sensor. Ele foi fixado no eletrodo metálico de C2 disponível na cabeça do sensor como podemos ver na Figura 2(b). Desta forma, este sensor pode medir a temperatura do centro do capacitor C2 uma vez que o eletrodo metálico conduz a temperatura para o sensor de temperatura.

O Sensor usa um microcontrolador para adquirir dados de tensão, corrente e temperatura. Ele calcula o CRC (verificação de redundância cíclica) e envia o quadro de dados para a unidade de processamento. As amostras de tensão e corrente têm 16 bits, as amostras de temperatura e a palavra CRC têm 8 bits. Um quadro de dados tem um total de 48 bits e é enviado a cada 40 μ s para a unidade de processamento. A taxa de amostragem do sensor é de 25 kHz. As aplicações PoF possuem uma limitação em alimentar cargas de alto consumo em sistemas de sensores tradicionais. Para obter uma unidade de sensor de baixo consumo foram utilizados componentes eletrônicos de baixa potência e técnicas de projeto, que como resultado, o sensor atingiu 80 mW de consumo de potência.

2.2. Unidade de processamento

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos funcional da unidade de processamento. Para simplificar sua representação, este diagrama é limitado à fase A. Os sinais de dados e relógio da unidade sensora são enviados para dois receptores de fibra óptica, colocados na unidade de processamento usando duas fibras ópticas do mesmo cabo, conforme já descrito. Na unidade de processamento, há também um field-programmable gate array (FPGA) e um analisador de qualidade de energia modelo MQ700 da IMS Power Quality. O FPGA recebe os dados dos receptores ópticos, verifica a mensagem CRC, ajusta a mudança de fase, corrige as amostras de tensão e corrente devido ao efeito da temperatura e envia amostras de tensão e amostras de corrente para o seu respectivo conversor analógico digital (DAC). Finalmente, os sinais são amplificados e entregues ao analisador de qualidade de energia elétrica.

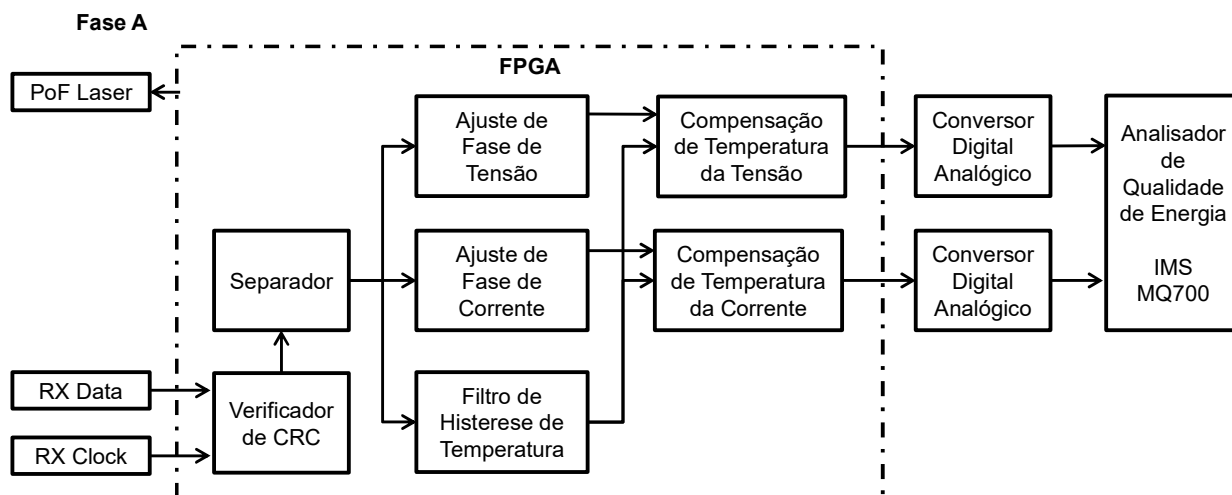


Figura 4 - Diagrama de blocos da unidade de processamento.

O bloco de verificação CRC analisa o código CRC de cada mensagem recebida. Se o código estiver incorreto, todo o quadro será descartado. Se estiver correto, todos os dados são enviados para o bloco separador. O bloco separador usa um contador para separar os dados de tensão, corrente e temperatura. A função dos blocos de deslocamento de fase é fornecer um ajuste da fase entre as medições de tensão e corrente. Esses blocos também permitem compensação de fase nos sinais de tensão e corrente devido a um acoplamento capacitivo presente no analisador de qualidade de energia. O bloco de deslocamento de corrente de fase também habilita uma bobina de Rogowski como sensor de corrente e, neste caso, os blocos atuam como um integrador. O bloco de filtro de histerese de temperatura evita correções desnecessárias nas amostras de tensão e corrente, e o bloco de compensação de temperatura corrige essas amostras devido ao efeito da temperatura no sensor. Finalmente, as amostras de tensão e corrente são enviadas para um DAC e entregues a um analisador de qualidade de energia MQ 700 da IMS Quality Power. Para aplicações futuras, o processamento totalmente digital (empregado no FPGA) será implementado no analisador de qualidade de energia.

3.0 TESTES EM LABORATÓRIO

O desempenho do sistema foi primeiramente avaliado em ambiente de laboratório (CEPEL/RJ), para verificar o desempenho em termos de precisão e largura de banda, para medições de corrente e tensão. Além disso, o sensor foi submetido à variação de temperatura e avaliado nesta condição. A Figura 5 mostra uma configuração usada para caracterizar o sensor em um laboratório de alta tensão.



Figura 5 - Montagem utilizada para a caracterização do sensor no CEPEL.

O sensor óptico atendeu aos critérios de precisão da IEC 61869-11 sendo classificado como um sensor de tensão de precisão de classe 0,5 para três possíveis classes de tensão fase-fase, que são: 11,9 kV, 13,8 kV e 23,0 kV (isso corresponde a tensões nominais fase-terra de 6,87 kV, 7,97 kV e 13,28 kV, respectivamente).

Na Figura 6(a), o erro de razão é a diferença da tensão de referência expressa em porcentagem e as barras de erro são o desvio padrão, também expresso em porcentagem, obtido após 5 medições. Os quadrados da Figura 6(a) delimitam de 80% a 120% de cada classe de tensão nominal fase-terra. Assim, o quadrado preto representa a tensão nominal fase-terra de 6,87 kV, o quadrado vermelho representa a tensão nominal fase-terra de 7,97 kV e o quadrado verde indica a tensão nominal fase-terra de 13,28 kV, conforme IEC 61869-11 o sensor deve atender a classe especificada de 80% a 120% da tensão nominal. Como pode ser visto, o mesmo sensor de tensão está dentro dos limites de precisão da classe 0,5 para essas três tensões nominais diferentes. A largura de banda, mostrada na Figura 6(b) obtida foi de 3 kHz a 3 dB, o que é suficiente para medir a tensão do até o 50º harmônico. Esta faixa de largura de banda está relacionada à taxa de amostragem da unidade do sensor (25 kHz) e não ao divisor capacitivo que tem uma boa resposta de frequência.

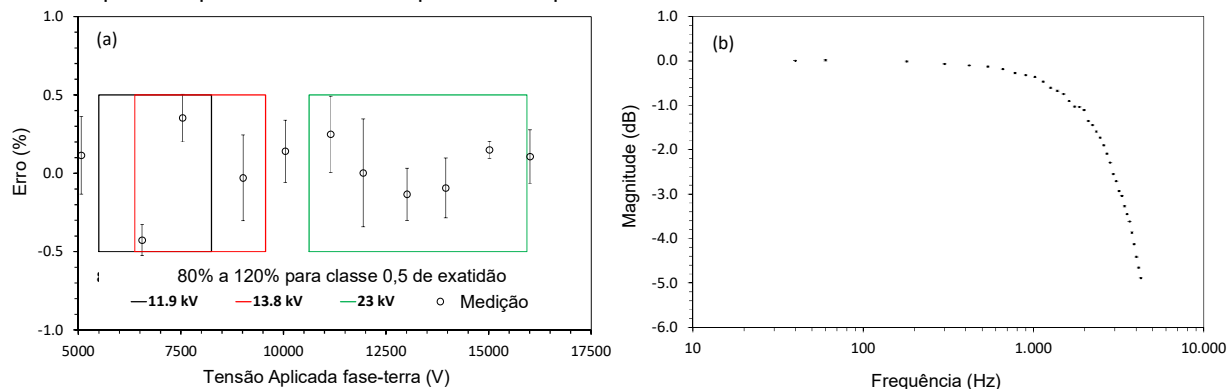


Figura 6 - (a) Exatidão e precisão na medição de tensão - (b) largura de banda da medição de tensão

Da mesma forma que as medições de tensão, a avaliação da resposta do sensor de corrente foi feita comparativamente com os resultados fornecidos por uma referência conhecida e confiável. A Figura 7(a) e a Figura 7(b) mostram a caracterização do erro de razão de duas versões de sensores para duas correntes nominais diferentes, respectivamente 25 A e 750 A. A Figura 7(c) mostra a caracterização da largura de banda do sensor de corrente. Para ambos os sensores de corrente, cinco medições foram realizadas variando a faixa de 0 a 120% da corrente nominal. Na Figura 7(a), esta variação corresponde a correntes que variam de 1,082 A a 26,26 A (ou 4,328% e 105,4% da corrente nominal de 25 A). Na Figura 7(b) esta variação corresponde de 25 A a 900 A (ou 3,33% a 120% da corrente nominal de 750 A). O desvio padrão das cinco medições foi usado para obter as barras de erro (precisão) para cada um desses percentuais de correntes nominais, enquanto o desvio da corrente aplicada ao valor médio dessas cinco medições é usado para calcular a precisão. Esses valores de barras de erro e precisão são expressos em porcentagem nesses gráficos. Conforme mostrado, o sensor atende aos critérios de precisão da IEC 61869-10 sendo classificado como um sensor de corrente classe 0,5 no caso da corrente nominal de 25 A e classe 0,2 para uma corrente nominal de 750 A. Porém, para a corrente nominal de 25 A, três pontos de 20% a 28% desta corrente nominal estão fora desta classe de precisão e uma classe de precisão inferior deve ser selecionada. Em outras palavras, para a corrente nominal inferior de 25 A, a classe de precisão correta é a classe de precisão 1.0. De acordo com a IEC 61869-10, o sensor de corrente deve atender a classe especificada de 5% a 120% da corrente nominal. O sensor de corrente foi desenvolvido para uma ampla faixa de medição, como correntes de 1,25 a 30 A ou 37,5 a 900 A. O erro de relação ficou dentro da classe estabelecida para cada faixa, com saturação em torno de 90/900 A (fora da faixa de medição) usando núcleo nano-cristalino, exceto para o sensor de faixa inferior, pois três pontos em torno de 20% da corrente nominal estavam fora dos limites da classe 0,5. Quanto à largura de banda, o resultado obtido foi de 4 kHz a 3 dB (65º harmônico). Para medições de tensão e corrente, a unidade do sensor está disponível para medições de qualidade de energia.

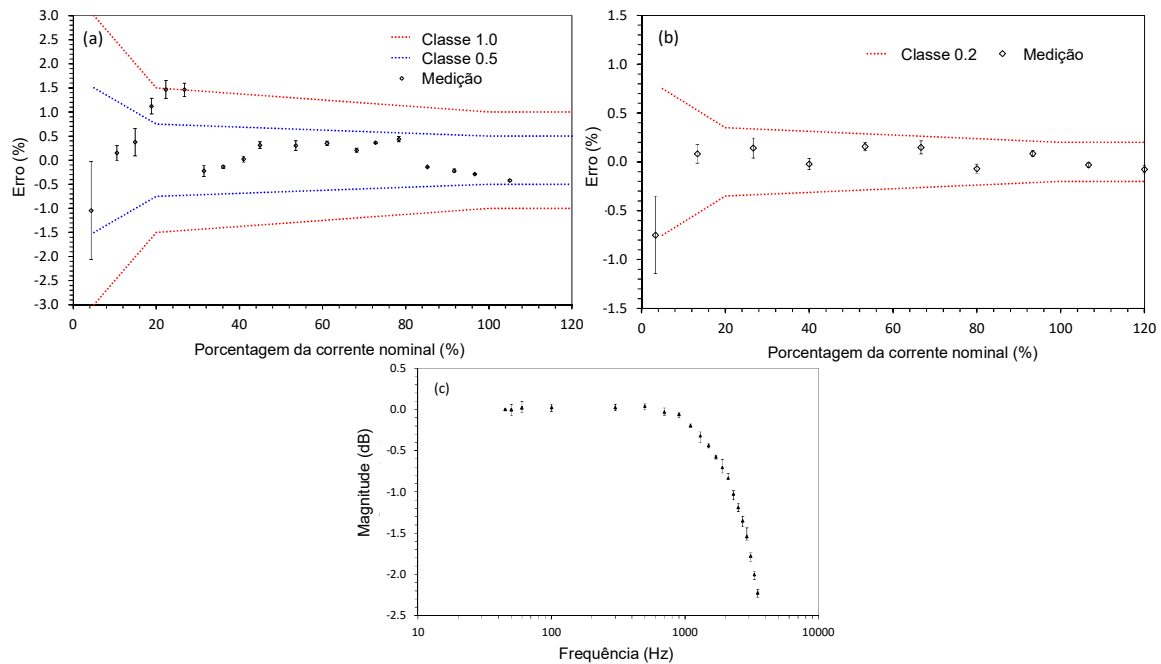


Figura 7 - (a) Exatidão e precisão do sensor de corrente para corrente nominal de 25A - (b) Exatidão e precisão do sensor de corrente para corrente nominal de 750 A - (c) largura de banda da medição de corrente.

4.0 Instalação e teste em campo na Rede Sinérgica – UniverCemig

No teste de campo mostrado na Figura 8, a unidade de processamento foi instalada em uma sala de controle e o sinal foi enviado para a sala de controle utilizando fibras ópticas de uma rede híbrida de distribuição de energia elétrica com dados em fibras ópticas, a Rede Sinérgica (RS). O caso de uso desta aplicação é onde, na rede de distribuição, não há corrente alternada de baixa tensão disponível. Outra aplicação possível, dentro de diversas possibilidades, é usar as fibras ópticas embutidas no condutor para alimentar os sensores, por exemplo, em uma área de pátio de subestação. Nos testes de campo, para simplificar a montagem em campo uma fase foi usada para testar os novos sensores ópticos.

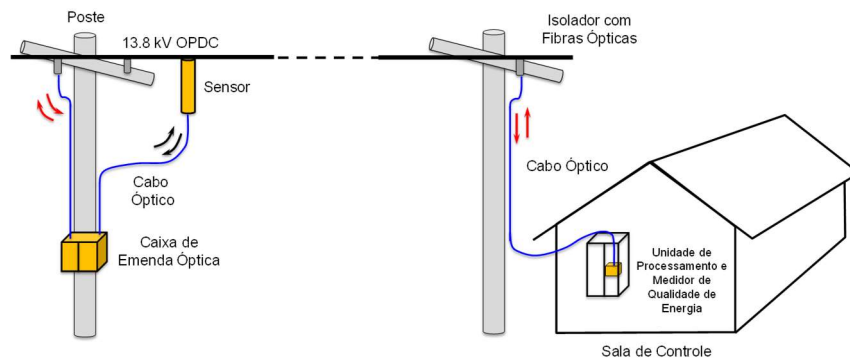


Figura 8. Esquema de instalação do sistema.

O teste de campo foi realizado no campus da UniverCemig em Sete Lagoas, Brasil. A Rede Sinérgica (RS) utilizada é composta por condutores de redes de distribuição com fibras ópticas integradas (OPDC) e acessórios de rede elétrica e óptica. Por mais de 10 anos essa nova topologia de Redes Sinérgicas vem se desenvolvendo por meio de aplicações e testes experimentais em um trecho real de rede da Cemig. A implantação da RS consistiu na substituição de cabos condutores tradicionais de 13,8 kV, recobertos ou não pelos mesmos modelos, mas com fibras ópticas embutidas. A substituição dos cabos convencionais e seu funcionamento representam uma real condição de uso, porém, em ambiente controlado.

Os cabos OPDC utilizados na RS SN são modelos modificados CAA 1/0 AWG (Raven), com 36 fibras ópticas, sendo 12 fibras multimodo de 62,5 μm , 12 fibras monomodo G657A BLI (baixa sensibilidade à curvatura) e 12 monomodo padrão G652D), modelos modificados CAA 4/0 AWG (Penguin), modelos CA coberto XLPE 50 mm^2 e

fio mensageiro 3/8", senso esses com 8 fibras multimodo 62,5 μm , 8 fibras monomodo G657A BLI e 8 fibras monomodo G652D. Para fornecer diferentes aplicações nesta rede, as caixas de terminação óptica (CTO) foram instaladas em alguns postes da RS. Cada CTO da rede possui uma disponibilidade de acesso em um par de fibras monomodo padrão, um par de fibras monomodo BLI e um par de fibras multimodo.

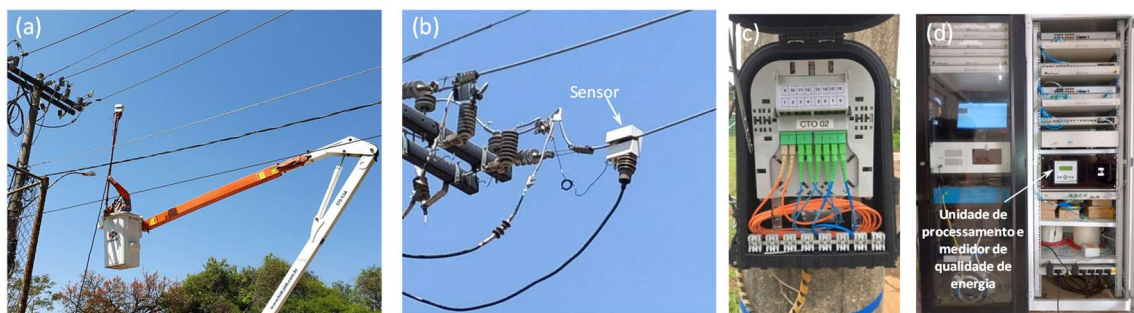


Figura 9 - (a) Sensor sendo instalado - (b) sensor já instalado no condutor - (c) Conexão das fibras ópticas da rede sinérgica - (d) local de instalação da unidade de processamento e do medidor de qualidade de energia elétrica na central de controle das Redes Sinérgicas na UniverCemig.

A instalação do sensor no condutor foi realizada com o auxílio de um bastão de fibra de vidro e um cesto aéreo (Figura 9(a)), em poucos minutos foi realizado o posicionamento e a fixação do sensor no condutor. Durante a instalação, a rede elétrica permaneceu energizada. As conexões das fibras dos sensores às fibras ópticas da RS foram feitas em uma caixa de terminação óptica instalada em um poste próximo ao ponto onde o sensor foi instalado (Figura 9(c)). A unidade de processamento foi instalada em um rack de 19" (Figura 9(d)) na sala de controle. A distância entre o sensor e a unidade de processamento foi de cerca de 700 metros. Mas a distância máxima poderia ser de até cerca de 1,8km.

A Figura 10(a) mostra o mapa da RS e a localização da instalação com alguns detalhes dos elementos do sistema, além da distribuição dos cabos ao longo da RS. A Figura 10(b) mostra a tensão e a corrente coletadas por um mês. Neste período de teste, a tensão medida pelo sistema teve um valor RMS em torno de 8 kV, adequado para uma rede fase-fase de 13,8 kV. A medição de corrente máxima e a mínima para o sensor foi 0,52 A e 3,75 A, adequada para a carga típica do campus. Os valores medidos de tensão mínima e a máxima foram 7,82kV e 8,07kV respectivamente com variação de -2,07% e 1,08%. Esta variação na medição de tensão não ultrapassa os valores permitidos pelas normas brasileiras de eletricidade [10]. Apesar de apresentados dados de medições de apenas um mês, o sistema está coletando dados desde o mês de agosto de 2020, tendo acumulado um período de 12 meses. Neste período, os sistemas têm funcionado corretamente, e isso demonstra que o projeto do novo sensor óptico é robusto o suficiente para aplicações externas, e que viabiliza o uso em larga escala. Em aplicações de qualidade de energia elétrica, o sensor convencional é usado em um ponto específico da rede de distribuição elétrica por cerca de trinta dias. O novo sensor mostrou uma oportunidade para que a QEE possa ser utilizada ao longo de toda a vida útil de uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica, aceita também a medição diretamente no ponto de entrega para unidades consumidoras atendidas na média tensão e também possibilita a medição antes do transformador, permitindo a atribuição de responsabilidade.

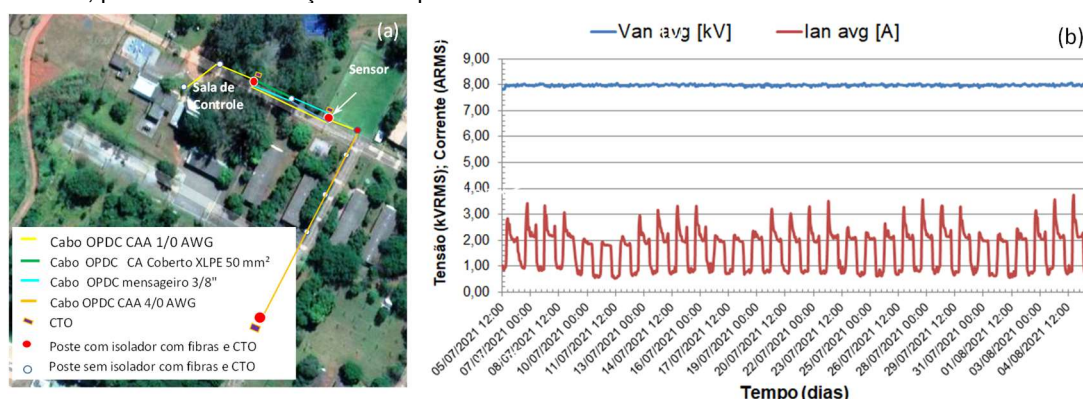


Figura 10 - (a) Vista aérea das instalações da rede sinérgica e locais de instalação dos elementos do sistema - (b) tensão e corrente medidos pelo sistema.

5.0 CONCLUSÃO

Neste informe técnico apresentamos um sistema de medição de qualidade de energia elétrica que utiliza a fibra óptica como meio de isolamento e transmissão de dados entre sensor e unidade de processamento. Detalhamos também a transmissão óptica e as interfaces de alimentação elétrica/óptica no sensor e na unidade de processamento, assim como os sensores usados para medir tensão, corrente e temperatura. Na unidade de processamento, também foi apresentado o mecanismo de compensação de temperatura e de fase.

Os resultados dos testes laboratoriais do sensor óptico foram reportados de acordo com os critérios da IEC 61869-10 e IEC 61869-11. O sensor de tensão é classificado como classe 0,5 para três tensões nominais fase-fase: 11,9 kV, 13,8 kV e 23,0 kV, o que corresponde a 6,87 kV, 7,97 kV e valores fase-terra de 13,28 kV. O sensor de corrente é de classe 1.0 para a faixa de 1,25 a 30 A e classe 0,2 para a faixa de 37,5 a 900 A.

No teste de campo, a unidade de processamento foi instalada em uma sala de controle e o sinal dos sensores, que foram instalados remotamente (700 m da unidade de processamento), foram enviados para a sala de controle utilizando fibras ópticas multimodo em uma rede experimental híbrida que utiliza cabos condutores com fibras ópticas integradas (RS). A alimentação do sensor foi realizada por outra fibra multimodo disponível neste condutor. Os dados de tensão e corrente obtidos durante 12 meses neste teste de campo demonstraram que o sensor é robusto o suficiente para aplicações externas, e que viabiliza o uso em larga escala.

Finalmente, podemos comparar os resultados obtidos com o LPIT (Low Power Instrument Transformer) proposto com soluções disponíveis na literatura. A nova solução óptica proposta é a primeira demonstração de um sensor de tensão e corrente para média tensão trabalhando em conjunto no mesmo caso e utilizando PoF. Além disso, o sensor óptico demonstrou a medição e transmissão simultânea de dados de tensão e corrente em uma operação contínua para baixos níveis de corrente (<1 A), conduzida em uma rede de média tensão de 13,8 kV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) E. Y. Song, G. J. FitzPatrick and K. B. Lee, "Smart Sensors and Standard-Based Interoperability in Smart Grids," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 23, pp. 7723-7730, 1 Dec. 1, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2729893.
- (2) Alonso, M.; Amaris, H.; Alcalá, D.; Florez R., D.M. Smart Sensors for Smart Grid Reliability. *Sensors* 2020, 20, 2187.
- (3) R. Moghe, F. C. Lambert and D. Divan, "Smart Stick-on Sensors for the Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3, 241-252, (2012).
- (4) F. Zavoda, C. Yakymyshyn, "Sensors for Smart Grids Smart Grids Technologies," *ENERGY 2013: The Third International Conference on Smart Grids Green Communications and IT Energy-aware Technologies IARIA*, 1, 83, (2013).
- (5) J. B. Rosolem, C. F. Barbosa, C. Floridia, and E. W. Bezerra, "A passive opto-electronic lightning sensor based on electromagnetic field detection for utilities applications," *Measurement Science & Technology*, 21, (2010).
- (6) Nascimento, C.; Rosolem, J.; Hortencio, C.; Dini, D.; Obara, L. The First Generation of Synergic Overhead Transmission Lines Network. In *Proceedings of the CIGRE-IEC 2019 Conference on EHV and UHV (AC & DC)*, Hakodate, Hokkaido, Japan, 23–26 April 2019.
- (7) EPRI, "Advanced Sensor Technology Applications for Smart Distribution Systems," 1020088, (2010).
- (8) A. Larrabeiti, Z. Ojinaga, V. Macías, I. Garabieta, J. A. Lozano and M. G. Zamalloa, "Low-power instrument transformer-based MV automation: lessons learned and future applications," in *CIGRE - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1291-1294, 10 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.1057.
- (9) Bassan, F.R.; Rosolem, J.B.; Floridia, C.; Aires, B.N.; Peres, R.; Aprea, J.F.; Nascimento, C.A.M.; Fruett, F. Power-over-Fiber LPIT for Voltage and Current Measurements in the Medium Voltage Distribution Networks. *Sensors* 2021, 21, 547. <https://doi.org/10.3390/s21020547>.
- (10) Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, "Procedimento de Distribuição - PRODIST Modulo 8", 2018.

DADOS BIOGRÁFICOS



FABIO BASSAN é natural de Americana, SP. Em 2017 concluiu o Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e em 2010 concluiu a graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Salesiana (UNISAL). Desde 2011 atua em projetos de pesquisa e desenvolvimento voltados ao setor elétrico no CPQD.

(2) JOÃO BATISTA ROSOLEM concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo em 2005. Atualmente é pesquisador do CPQD. É líder técnico do laboratório LSMO (Laboratório de Sensoriamento e Monitoração Óptica) do CPQD. Suas áreas de atuação em sensoriamento são: dispositivos de fibras ópticas, sensores de fibra óptica, sensores para sistemas de energia Elétrica. Desde 2020 coordena o grupo de trabalho Low Power Instrument Transformers (LPIT) do CIGRE Brasil. É bolsista de Produtividade e Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora do CNPq - Nível 1D. Em 2021 foi nomeado como Embaixador do CPQD.

(3) BRUNO NOGUEIRA AIRES possui graduação em Engenharia de Telecomunicações pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (2012). Atualmente trabalha na Fundação CPQD desde 2011. Tem experiência na área de infraestrutura de Redes Ópticas, atuando em projetos de relacionados a cabos com fibras ópticas e acessórios. Participou do desenvolvimento de microcabos ópticos, com participação em fóruns para a especificação de requisitos e elaboração de normas técnicas. Desenvolve trabalhos de pesquisa e coordenação em projetos do setor elétrico no desenvolvimento de sistema com cabos condutores com fibras ópticas integradas e sensores ópticos para monitoramento de barragens. Atua também no laboratório de certificação de cabos ópticos e acessórios.

(4) RODRIGO PERES possui graduação em Engenharia Física pela Universidade Federal de São Carlos (2011). Atualmente, cursa mestrado na Faculdade de Tecnologia na Unicamp, e é pesquisador da Fundação CPQD, atuando em projetos de P&D para o setor elétrico no desenvolvimento de sensores ópticos para o monitoramento e supervisão de linhas de transmissão, subestações e em barragens de usinas hidrelétricas, também é um dos responsáveis pelos ensaios ópticos no laboratório de homologação de cabos ópticos. Tem experiência na área de Física, com ênfase em redes de sensoriamento óptico, desenvolvimento de software na plataforma LabVIEW e projetos mecânicos utilizando ferramenta computacional SolidWorks.

(5) CARLOS ALEXANDRE MEIRELES DO NASCIMENTO é Engenheiro de TECNOLOGIA da Cemig D. Doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG (2009), com graduação e mestrado em engenharia mecânica. Experiência em Engenharia de Energia Elétrica, com ênfase em Inovações, atuando: monitoramento de ativos GTD, projetos de linhas e redes, ampacidade, fibras opticas, condutores especiais, supercondutores. Atua nos estudos de tecnologias emergentes, tais como: Energias Alternativas; Hidrogênio; Robótica Aplicada; Digitalização; Redes Inteligentes e Eletrificação. Premiação: Prêmio Cigre Internacional Distinguished Member Awards 2020; Paper Award Japão 2021 em Tecnologias Ópticas; 1º. Prêmio Mineiro de Inovações e outros prêmios internacionais e nacionais. Possui 15 registros de patentes, marcas e softwares no INPI.

(6) CLAUDIO FLORIDIA nasceu em Ancona, Itália, em 1971, é bacharel em Física pela USP (1995), é mestre em Geofísica pela UFBA (1998), e obteve seu Ph.D. em Física pela UFPE em 2003. Desde 2005, ele é pesquisador do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD). Ele tem se envolvido com sensores e sistemas de fibra óptica, sensoriamento distribuído, sensores ópticos de tensão e corrente, técnicas de espectroscopia óptica, entre outros. O Dr. Floridia é autor de mais de 70 artigos em periódicos e conferências e é o titular de 2 patentes norte-americanas, 8 patentes no Brasil.

(7) JAVIER APREA é Consultor Técnico para Projetos de Inovação e Assuntos Regulatórios (Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4832267999569935>): Graduação em Engenharia Elétrica (1987) e Mestrado Acadêmico em Computação (1991) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e Mestrado em Engenharia Elétrica (1994) pela Universidade Tecnológica de Eindhoven – TU/e na Holanda. Ampla experiência como Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos Inovadores, sendo o responsável pelo desenvolvimento de equipamentos e software para medição, análise e controle das grandezas elétricas e qualidade. Atuou por 16 anos como Engenheiro de Desenvolvimento pela Philips na Holanda e 10 anos como Gerente de P&D pela IMS Power Quality.

(8) FABIANO FRUETT recebeu o grau de engenheiro eletricista pela UNESP-Ilha Solteira, e o grau de mestre em microeletrônica UNICAMP. Fabiano obteve seu Ph.D. em setembro de 2001 pela Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda. Os principais resultados de seu trabalho de doutorado foram publicados em mais de uma dezena de artigos científicos além de um livro de sua autoria. Desde 2002 trabalha como docente na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP. Seus interesses em pesquisa estão no campo dos

Sistemas Microeletromecânicos (MEMS), eletrônica analógica, sensores, instrumentação eletrônica e internet das coisas (IoT).