

MONITORAMENTO DE CHAVES SECCIONADORAS DE ALTA TENSÃO POR SENSORES ULTRASSOM ALIMENTADOS POR FIBRA ÓPTICA

THAYANE. ALVES, A*, STENIO. ARAÚJO, L*, WILLIAN. LOPES, S*, CLAUDIO. FLORIDIA**, JOÃO. ROSOLEM, B**, RIVAE. PENZE, S**, FABIO. BASSAN, R**.

*IFBA – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – Câmpus Vitória da Conquista

**CPQD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações.

E-mails: thayaneaalves@gmail.com, stenio.longo@gmail.com, wslopes.cte@gmail.com, floridia@cpqd.com.br, rosolem@cpqd.com.br, rpenze@cpqd.com.br, fbassan@cpqd.com.br.

Abstract – The transmission and distribution companies electricity seek sensing systems that reduce electricity losses due to poor closing of switchgears, increasing the safety during handling and reducing operating costs. This article presents the development of a switchgear monitoring system using ultrasound sensors powered by optical fiber. The sensing system has two main units: the remote sensing unit and the control and data acquisition unit. The sensing unit is connected to the control and data acquisition unit via an optical cable with two fibers. The fibers carry the power and data signals. The remote sensing unit measures the position of the switchgear arm and sends these data via an optical fiber to the control and data acquisition unit. The control and data acquisition unit performs communication with external computer and data to be listed in real time by an application developed in LabVIEW. The test results showed that the sensing system can correctly measure the position of the switchgear arm, setting the electrical contact quality parameter.

Keywords – Sensor, ultrasound, switchgears, fiber optics, immunity, predictive.

Resumo – As concessionárias de transmissão e distribuição de energia elétrica buscam sistemas de sensoriamento que reduzam as perdas de energia elétrica devido ao mau fechamento das chaves seccionadoras, aumentando a segurança durante manobras e reduzindo os custos operacionais. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoração de chaves seccionadoras utilizando sensores ultrassom alimentados por fibra óptica. O sistema de sensoriamento possui duas unidades principais: a unidade de sensoriamento remoto e a unidade de controle e aquisição de dados. A unidade de sensoriamento está interligada a unidade de controle e aquisição de dados através de um cabo óptico com duas fibras. As fibras transportam os sinais de potência e dados. A unidade de sensoriamento remoto mede a posição do braço da chave seccionadora e envia esses dados por meio de uma fibra óptica para a unidade de controle e aquisição de dados. A unidade de controle e aquisição de dados realiza a comunicação com computador externo e os dados são coletados em tempo real por uma aplicação desenvolvida em LabVIEW. Os resultados dos testes mostraram que o sistema de sensoriamento consegue medir corretamente a posição do braço da chave seccionadora, estabelecendo o parâmetro de qualidade do contato elétrico.

Palavras-chave – Sensor, ultrassom, chaves seccionadoras, fibra óptica, imunidade, preditiva.

1 Introdução

Grandes esforços têm sido adotados por concessionárias do setor elétrico de potência, com intuito de migrar de manutenção preventiva para manutenção preditiva, através de supervisão on-line. No entanto, a complexidade do sistema elétrico que inclui as linhas de transmissão, subestações, equipamentos elétricos de potência e o ambiente com alta concentração de campos eletromagnéticos, impõe a necessidade do uso de sensores imunes a interferências eletromagnéticas. Nas subestações de alta tensão um dos equipamentos elétricos de operação e manobra é a chave seccionadora. Nessas chaves, a manutenção preditiva pode ser empregada para a determinação da qualidade de contato, a fim de garantir uma boa condução elétrica entre a conexão dos terminais e evitar problemas de superaquecimento. Este fato tem sido um problema na automação de subestações cau-

sando a necessidade de uma supervisão local durante a operação de chaves seccionadoras.

Desta forma, muitas técnicas e estratégias foram revisadas para monitoramento e supervisão de chaves seccionadoras e outros equipamentos do sistema elétrico de potência (Sweetser *et al.*, 2002). A utilização de sensor eletrônico associado a uma técnica de transmissão de dados sem fio foi proposto por Chen (2007) para monitoramento on-line da temperatura dos contatos de chaves seccionadoras. O uso de sensores convencionais, como transformadores de medição de corrente, sensores de pressão, sensores de temperatura PT100 foram estudados num complexo sistema de monitoração de chaves seccionadoras e outros equipamentos do sistema elétrico de potência (Meštrovic *et al.*, 2009). Recentemente, técnicas de monitoramento têm utilizado a tecnologia de alimentação de sensores por fibra óptica para monitoramento de chaves seccionadoras. Nesse sistema a qualidade do contato é analisada tanto por micro câmeras alimentadas através de fibra óptica, como pela análise de deflexão de um feixe de luz, a

fim de quantificar a qualidade do contato da chave (Rosolem *et al.*, 2015).

Neste trabalho, também foi aplicada a técnica de alimentação de sensores por fibra óptica para constatar a utilização de sensores ultrassom na monitoração de chaves seccionadoras de alta tensão e abertura vertical. O uso da técnica *Power over Fiber* (PoF) para alimentar um sensor ultrassom é uma evolução natural dos desenvolvimentos anteriores do CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações) nesta tecnologia, conforme descrito por Penze (2014).

O sistema de monitoramento com sensores ultrassom alimentados por fibra óptica busca, principalmente, garantir a isolamento galvânica da unidade de sensoriamento. A utilização de sensores ultrassom pode impactar positivamente nos custos finais da produção do sistema de sensoriamento. O desenvolvimento, medições e testes de um protótipo do sistema proposto foram realizados nos laboratórios do CPqD em um arranjo simulador de chave seccionadora não energizada.

2 Sistema para Monitoramento de Chaves Seccionadoras

O sistema proposto para monitoramento de chaves seccionadoras é formado basicamente pela unidade de sensoriamento remoto (USR), a unidade de controle e aquisição de dados (UCAD) e a interface gráfica para o operador do sistema. A USR está conectada a UCAD por meio de um cabo, contendo duas fibras ópticas. A Figura 1 ilustra a transmissão de dados e potência por fibra óptica. Essa técnica conhecida como *Power over Fiber* (PoF) baseia-se no uso de um laser de alta potência como fonte de alimentação para equipamentos remotos em ambientes extremos (Perhirin *et al.*, 2013).

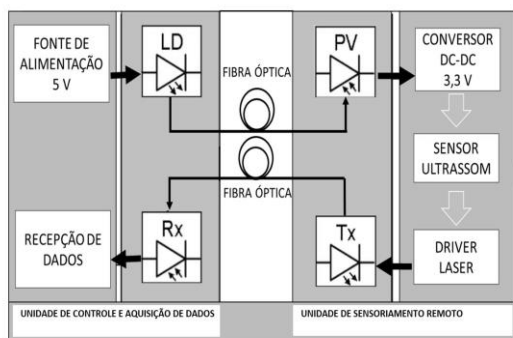


Figura 1. Esquemático da transmissão de dados e potência por fibra óptica. (Adaptado, Perhirin *et al.*, 2013).

2.1 Alimentação da USR por Fibra Óptica

A utilização da técnica *Power over Fiber* configura um sistema óptico de sensoriamento extrínseco

indicado para ambientes extremos. Esse sensoriamento é considerado extrínseco, pois, a fibra óptica é usada apenas como meio de transmissão de sinais. Dentre as principais vantagens do PoF está a passividade elétrica e a imunidade a interferência eletromagnética que são características inerentes da fibra óptica.

Para implementação da técnica *Power over Fiber* foram utilizados os seguintes componentes: laser de alta potência, célula fotovoltaica, cabo óptico e outros componentes eletrônicos.

O laser utilizado como fonte de potência possui comprimento de onda de 830 nm. Essa região de emissão é considerada próxima do infravermelho (780 – 850 nm). Isso impõe limitações no comprimento máximo do enlace de fibra. Nesse caso, o limite está em torno de 1 km devido às perdas por atenuação da luz na fibra.

Para o desenvolvimento do projeto foram realizadas caracterizações da célula fotovoltaica, com diferentes cargas. A célula fotovoltaica utilizada foi o PPC-6E da *JDS Uniphase Corporation*. A Figura 2 mostra a curva de tensão versus corrente do PPC-6E.

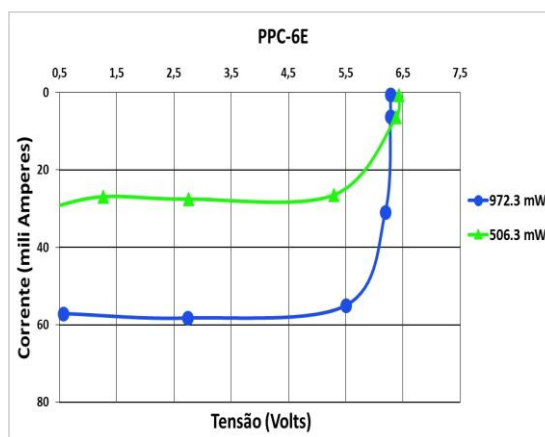


Figura 2. Caracterização do PPC-6E.

Após realização da caracterização, a eficiência de conversão do PPC-6E foi calculada para obtenção do melhor ponto de operação da célula fotovoltaica. A eficiência é um fator crítico das células fotovoltaicas que apresentam baixo rendimento.

Constatou-se que o rendimento máximo do PPC-6E está em torno de 30%. Esse resultado é esperado, conforme dados disponibilizados pelo fabricante.

Para garantir estabilidade ao nível de tensão para alimentação do sensor ultrassom foi utilizado o conversor DC-DC LT1764. Esse é um conversor abaixador, ou seja, ele irá receber a tensão fornecida pelo PPC-6E (aproximadamente 6 Volts) e converter para 3.3 volts (tensão de alimentação do sensor ultrassom).

2.2 Unidade de Sensoriamento Remoto

No sistema de monitoramento da Figura 1, a USR é composta basicamente por sensor ultrassom, célula fotovoltaica, conversor DC-DC, circuito driver e o laser 1310 nm. A célula fotovoltaica converte o sinal óptico de alta potência em um sinal elétrico que irá alimentar a USR. Para que o sensor ultrassom seja alimentado com níveis de tensão adequados, o sinal elétrico da célula fotovoltaica é regulado por um conversor DC-DC.

Na Figura 3 pode ser observado um enlace de fibra óptica conectado à unidade sensoriamento. Esse enlace possui duas fibras, uma fibra carrega os sinais de dados fornecidos pelo sensor ultrassom e a outra transporta a potência óptica que alimenta a unidade de sensoriamento remoto.

A principal função da unidade de sensoriamento remoto é a medição da posição do braço da chave seccionadora. A Figura 3 apresenta o esquemático mostrando a posição de instalação da USR. Ainda conforme a Figura 3, a unidade de sensoriamento fica instalada na base da chave seccionadora de abertura vertical. De modo que, o sensor ultrassom fica apontado para o braço da chave, e os pulsos ultrassônicos que o sensor emite batem no braço da chave e são refletidos de volta para o sensor.

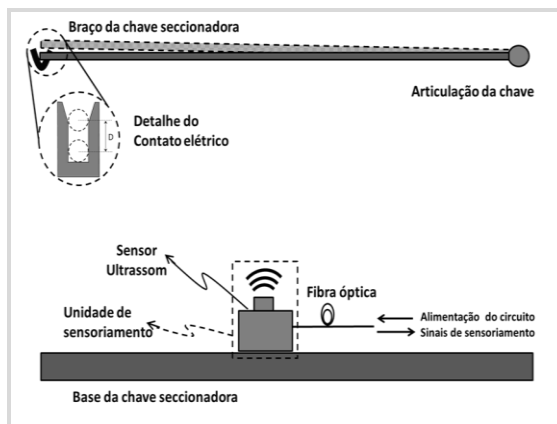


Figura 3. Arranjo para medição da posição do braço da chave seccionadora.

A posição do braço é a distância que o pulso percorreu, podendo ser determinada com base no tempo de ida e volta do pulso ultrassônico. A distância é calculada com base na velocidade de propagação do som no ar na temperatura de 25°C.

A velocidade do som é definida pela taxa de variação do deslocamento das partículas em função do tempo. As características do meio alteram os índices de atenuação das ondas sonoras. Outro fator que interfere na velocidade de propagação do som é a temperatura do meio (Terzic *et al.*, 2013).

$$C_{air} = C_0 + K.T \quad (1)$$

Na equação descrita em (1), C_{air} é a velocidade do som no ar, C_0 é a velocidade do som na atmosfera na temperatura de zero grau Celsius. A variável T é a temperatura do ar em graus Celsius e K é a taxa de variação da velocidade em função da temperatura, na literatura o valor de K está em torno de 0.607 m/s para cada 1°C de temperatura.

No desenvolvimento da unidade de sensoriamento remoto foram testados dois sensores ultrassom (MB7076 e MB7387) da MaxBotix (2016). Ambos os sensores utilizados são certificados para operarem em ambientes com temperaturas que variam de 40°C negativos a 65°C positivos. O sensor MB7076 possui capacidade de medir distâncias de até 10 metros com resolução de 1 centímetro. Posteriormente foi testado o sensor MB7387, esse sensor pode medir distâncias de até 5 metros com resolução de 1 milímetro. Ambos os sensores possuem um mecanismo interno de compensação de temperatura. Também é possível inserir sensores de temperatura externos para compensação da velocidade de propagação do som, conforme equação (1).

No detalhe do contato elétrico aumentado na Figura 3 está em destaque o deslocamento D . Durante a realização dos testes em laboratório o valor de D foi alterado manualmente através de um micrômetro, para validar o funcionamento do sistema de monitoração.

Um parâmetro de qualidade de contato (CQP) foi calculado, a fim de quantificar a qualidade de fechamento da chave seccionadora de alta tensão. Esse parâmetro foi definido por Rosolem *et al.* (2015), podendo ser escrito em termos do deslocamento D .

$$CQP = 100. \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_T} \right) \right] \quad (2)$$

Onde D_i é o deslocamento relativo instantâneo do braço da chave em relação a posição de referência (chave fechada) e D_T é o deslocamento máximo do braço da chave em relação a posição de referência.

Os sensores ultrassom utilizados fornecem os dados de saída em três formatos: sinal modulado em largura de pulso, sinal de tensão analógica, saída serial RS232. Isto é, todos os formatos de dados são sinais elétricos. Portanto, para transmissão dos dados medidos pela USR para a UCAD foi desenvolvido um circuito driver para modular um laser de 1310 nm. Esse circuito possibilitou que os dados do sensor ultrassom fossem convertidos para sinais ópticos e posteriormente transmitidos via fibra óptica para a unidade de controle e aquisição de dados.

A Figura 4 exhibe o encapsulamento final da unidade de sensoriamento remoto. Nessa unidade foi utilizado o sensor MB7387 por apresentar maior precisão e resolução durante dos testes em laboratório.



Figura 4. Encapsulamento final da USR.

A potência elétrica requerida pela unidade de sensoriamento remoto está em torno de 200 mW. Essa demanda pode ser facilmente suprida pela célula fotovoltaica (PPC-6E) que fornece até 500 mW de potência.

2.3 Unidade de Controle e Aquisição de Dados

No esquemático da Figura 1, a unidade de controle e aquisição de dados contém um laser de alta potência e um conversor óptico elétrico. O laser é usado para emitir o sinal óptico de alta potência que irá alimentar o sensor ultrassom. O conversor óptico elétrico recebe o sinal de dados emitido pelo laser de 1310 nm que está localizado na USR.

A alimentação da unidade de controle e aquisição de dados foi realizada com uma fonte de 5 volts e 1.2 amperes. Esse considerável consumo de energia deve-se ao laser de alta potência.

A unidade de controle e aquisição de dados possui duas funcionalidades: o fornecimento de potência para alimentar a USR e a recepção e conversão dos dados para o padrão de comunicação serial RS232.

Os dados que são disponibilizados pela UCAD no formato serial RS232 serão coletados por uma aplicação desenvolvida em LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). Nessa aplicação é possível receber os dados em tempo real da UCAD e visualizar através de uma interface gráfica também desenvolvida no LabVIEW, o deslocamento do braço da chave seccionadora.

2.4 Interface gráfica para Operador do Sistema

Uma interface gráfica de comunicação com a unidade de controle e aquisição de dados foi desenvolvida em LabVIEW, essa aplicação usa a interface serial RS232 para coletar os dados disponibilizados pela UCAD. Com o intuito de facilitar a leitura dos dados pelo operador do sistema de sensoriamento, foi desenvolvida uma interface gráfica no LabVIEW.

No aplicativo criado em LabVIEW é possível configurar a taxa de transmissão de dados, quantidade de bits, inserção de paridade, conforme as especificações de cada sensor ultrassom.

Os dados fornecidos pelos sensores estão codificados em ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Em cada medição realizada o sensor MB7387 envia o caractere “R” seguido pelo valor de distância em milímetros. Exemplo: R3450 indica que o alvo está a 3.450 metros de distância do sensor. O sensor MB7076 fornece o caractere “R” seguido pela distância em centímetros. Exemplo: R168 indica que mediu a distância de 1.680 metros.

A Figura 5 apresenta a interface gráfica desenvolvida em LabVIEW. Através dessa interface o operador do sistema poderá configurar os dados de comunicação serial, iniciar a coleta de dados e selecionar o local para salvar os dados medidos.

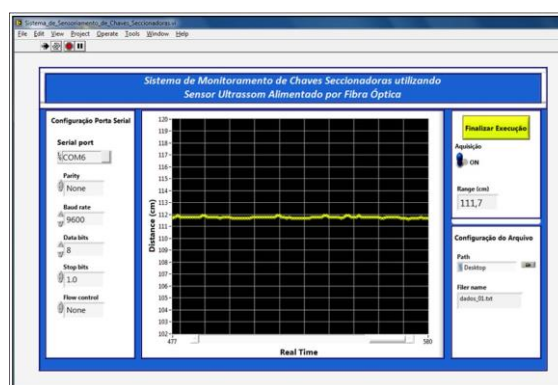


Figura 5. Interface gráfica de aquisição de dados.

Os dados são exibidos em tempo real na tela em formato gráfico e no lado direito da Figura 5 é possível observar os valores de distância medidos em centímetros.

3 Resultados e Testes Experimentais

A configuração apresentada na Figura 6 mostra o arranjo utilizado para medição e caracterização do sistema de monitoramento de chaves seccionadoras.

Os testes foram feitos em um arranjo simulador de chave seccionadora não energizada e, conforme a Figura 6 os elementos em destaque são a USR, a UCAD, o contato da chave seccionadora e a fonte de alimentação.

Os sensores ultrassom utilizados possuem diferentes alcances e resoluções definidos pelo fabricante. Conforme o fabricante os sensores MB7387 e MB7076 estão designados para medirem objetos posicionados localizados até 5 e 10 metros de distância, respectivamente. Durante os testes em laboratório percebeu-se que a distância de medição influencia na estabilidade dos valores medidos pelo sensor. Isto é, apesar de existir um alcance máximo de-

finido pelo fabricante, ambos sensores apresentaram dificuldade para detectar o alvo (braço da chave seccionadora) quando posicionados a distâncias superiores a 1.3 metros do alvo.

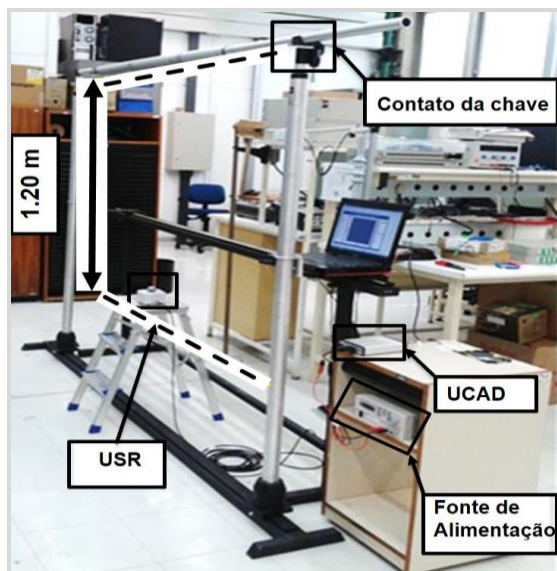


Figura 6. Arranjo experimental.

Com a configuração da Figura 6 foram coletados dados dos sensores MB7076 e MB7387. Os resultados das medições podem ser observados na Figura 7. Nos testes variou-se o valor deslocamento D referente a posição de fechamento do contato da chave seccionadora.

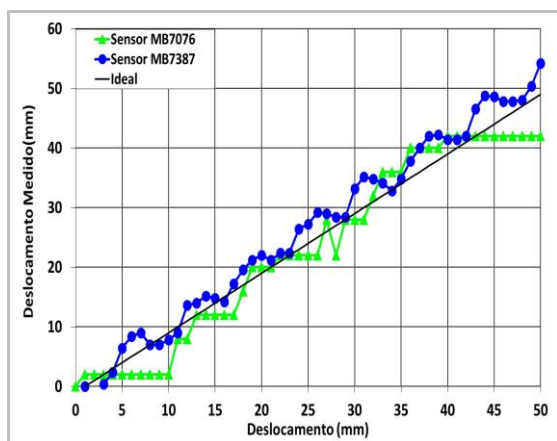


Figura 7. Deslocamento (D) medido pela USR.

A curva de referência (Ideal) da Figura 7 representa os resultados esperados. Os sensores MB7076 e MB7387 apresentaram uma resposta coerente. Contudo, o sensor MB7387 apresentou melhor desempenho por sua resolução ser dez vezes superior à resolução do MB7076.

Na Figura 8 o erro absoluto percentual foi calculado com os valores medidos pelos sensores MB7076 e MB7387.

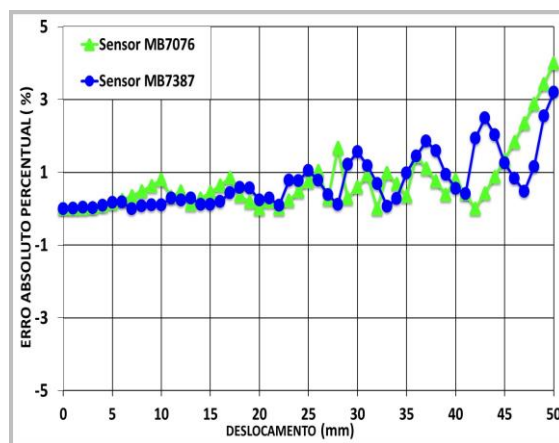


Figura 8. Erro relativo percentual calculado.

Na Figura 8 o erro absoluto percentual máximo calculado está em torno de 3% para o sensor MB7387. Já o sensor MB7076 apresentou erro absoluto máximo acima de 3%.

O parâmetro de qualidade do contato (CQP) foi calculado de acordo com a equação descrita em (2). Os valores do CQP para ambos os sensores ultrasom estão apresentados na Figura 9.

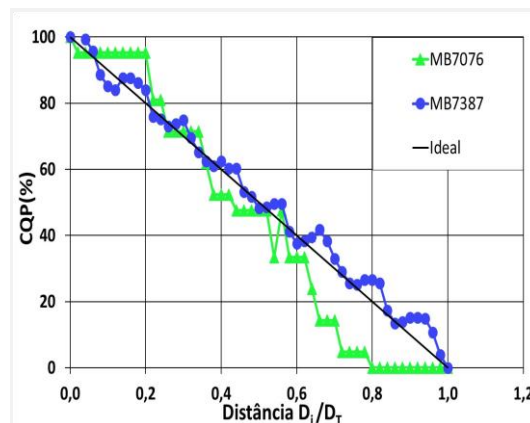


Figura 9. Parâmetro de qualidade de contato.

Analisando a equação descrita em (2) observamos que para $D_i = 0$, o parâmetro de qualidade de contato assume valor máximo. Isto é, a chave seccionadora encontra-se fechada. Para $D_i = D_T$, então CQP assume valor zero, ou seja, a chave seccionadora encontra-se totalmente aberta. Para valores no intervalo $0 < D_i < D_T$ ocorre o mau fechamento da chave seccionadora. Essa situação pode representar perdas de energia geradas pelo aquecimento do contato da chave seccionadora.

A unidade de sensoriamento remoto poderá ser instalada em ambiente externo, estando sujeita a condições de intempéries. Alguns testes foram realizados simulando ambiente submetido a chuvas. Nesse caso o acúmulo de água não danifica a USR. Os testes indicaram que o acúmulo de pequenas gotas de água na superfície do sensor não inserem erros nas medições. Quando a superfície do sensor está totalmente coberta pela água o resultado medido

pelo sensor é o valor mínimo. Isso pode ser explicado pelo fato de que os pulsos enviados pelo sensor ultrassom detectam a água presente em sua superfície, desprezando assim o alvo real.

A presença de objetos próximos da unidade de sensoriamento remoto promove dificuldades na medição, tendo em vista que o sensor ultrassom poderá detectar esses objetos inserindo erros na medição. Esse problema de detecção pode causar ondulações na medição como observado na Figura 7.

4 Conclusão

A aplicação da técnica *Power over Fiber* para alimentar a unidade de sensoriamento agrega um diferencial no projeto, tendo em vista que a imunidade à interferência eletromagnética é um requisito importante para os sistemas de sensoriamento implantados em subestações de alta tensão. Entre os estudos e testes realizados constatou-se que o sistema PoF consegue alimentar a unidade de sensoriamento remoto que consome aproximadamente 200 mW de potência.

Os resultados dos testes apresentados mostraram que o sistema de monitoramento de chaves seccionadoras utilizando sensores ultrassom alimentados por fibra óptica consegue medir a posição do braço da chave seccionadora. O sensor MB7387 apresentou alta resolução nas medições com erro relativo percentual menor ou igual a 3%.

A unidade de sensoriamento remoto desenvolvida para o sistema de monitoramento de chaves seccionadoras apresentou robustez para operação em condições de intempéries, simuladas em laboratório. A utilização de sensores ultrassom para medir a qualidade do contato elétrico de chaves seccionadoras é uma opção a ser considerada, tendo em vista os resultados alcançados.

Considerando os efeitos da temperatura na propagação do som no ambiente, poderá ser incorporado ao sistema de sensoriamento mecanismos externos de compensação de temperatura. Esses mecanismos poderão conferir maior precisão nas medições dos sensores.

O cálculo do parâmetro de qualidade do contato, mostra-se como um método efetivo para avaliar a qualidade do contato de chaves seccionadoras. Validando a implementação da manutenção preditiva em subestações de energia elétrica.

Em trabalhos futuros poderão ser utilizados sensores ultrassom com maior alcance e resolução para aumentar o intervalo de medição da unidade de sensoriamento remoto. O sistema de sensoriamento poderá ser adaptado para medições em outros tipos de chaves seccionadoras. Aperfeiçoamentos futuros também poderão incluir câmeras de vídeo na USR para monitoramento visual em tempo real da chave seccionadora.

Agradecimentos

Ao CPQD pelo uso dos laboratórios e materiais bem como pela ajuda de todos os pesquisadores do LSMO-CPqD (Laboratório de Sensoriamento e Monitoração Óptica). Ao IFBA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia) pelo apoio para participação no Congresso Brasileiro de Automática, edição 2016.

Referências Bibliográficas

- Chen, H. (2007). Online Temperature Monitoring Instrument for Contact of Circuit Break Truck in AIS Switchgear. CIREN – 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007.
- MaxBotix (2016). [Online] MaxBotix Ultrasonic Sensors. Available from: <http://www.maxbotix.com> [Accessed 02/03/16].
- Meštrovic, K. *et al.* (2009). New Concept of High-voltage Switchgear On-line Monitoring System. 16th International Symposium on High-voltage Engineering, Johannesburg, August 2009.
- Penze, R. S. *et al.* (2014). Sistemas de Sensoriamento Ópticos de Alta Isolação Galvânica para uso na Monitoração de Ativos do Setor Elétrico. In: XXI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI, 2014, Santos. Anais do XXI SENDI, 2014.
- Perhirin, S. *et al.* (2013). A Power-Over-Fiber System and its Low Consumption Remote Equipment for Submarine Applications. OCEANS - MTS/IEEE, Bergen, June 2013.
- Rosolem, J.B. *et al.* (2015). Quantitative and Qualitative Monitoring System for Switchgear with Full Electrical Isolation Using Fiber-Optic Technology. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.30, No. 3, pp. 1449 - 1457.
- Sweetser, C. *et al.* (2002). Strategies for Selecting Monitoring of Circuit Breakers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No. 3; pp. 742- 746.
- Terzic, J. *et al.* (2013). Ultrasonic Sensors Technology. In: Ultrasonic Fluid Quantity Measurement in Dynamic Vehicular Applications. 1th ed. Springer International Publishing, pp. 11 - 35.