



MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM PONTOS QUENTES DE SUBESTAÇÕES UTILIZANDO SENSORES PASSIVOS E ATIVOS

MARCO ANTONIO MARTINS CAVACO, MAURO EDUARDO BENEDET

Laboratório de Metrologia e Automatização
Universidade Federal de Santa Catarina
Caixa Postal 5053, CEP 88040-970, Florianópolis, Brasil

(Recibido 18 de febrero de 2011, para publicación 10 de marzo de 2011)

Resumo – Em diversas aplicações no campo da metrologia não é trivial a ligação direta do elemento sensor com a respectiva unidade de tratamento de sinais do sistema de medição. Pode-se citar como exemplo a medição de pontos quentes em subestações de energia elétrica devido ao alto potencial elétrico. Pensando na solução desse problema duas alternativas foram estudadas, uma usando sensores ativos e outra, passivos. Para os sensores passivos utilizou-se a tecnologia SAW RFID. Essa tecnologia é muito utilizada em sistemas de identificação, mas sua aplicação no campo da metrologia é inovadora. A variação da temperatura provoca alterações nas características do material piezoelétrico da etiqueta SAW, dentre elas a frequência de ressonância. O problema de medição da temperatura baseia-se na identificação da frequência de ressonância da etiqueta SAW em um determinado momento. No anseio de obter maiores alcances foi estudada também a aplicação de sensores ativos para a solução do problema.

Palavras-chave – Pontos quentes, RFID, SAW, sensores ativos, sensores passivos.

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço na tecnologia dos sensores, aplicações de medição que antes estavam sem solução começam a ser implementadas. Dentro desse avanço estão as aplicações de medição que não permitem conexão física entre o transdutor e a unidade de processamento de sinais. As medições de temperatura em conectores elétricos utilizados em subestações de distribuição de energia elétrica e em emendas de cabos elétricos de alta tensão estão entre essas aplicações.

A utilização de ondas de rádio para estabelecer comunicação entre o transdutor e a unidade de tratamento de sinais mostra-se uma solução adequada para tais situações. No entanto, para utilizar estes canais de comunicação, algumas considerações devem ser ressaltadas, entre elas pode-se citar: interferência eletromagnética, relação sinal/ruído, frequência da portadora e alcance de transmissão [1-3].

Uma das técnicas promissoras para serem empregadas na área de medições sem fio é o uso de sensores que trabalham segundo uma variação da técnica de RFID (*Radio-Frequency Identification*) através de medição passiva. Tal tecnologia é conhecida na literatura por sensores de ondas acústicas superficiais, do inglês *Surface Acoustic Waves* (SAW). O princípio de funcionamento está fundamentado na teoria do RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e na alteração do comportamento de materiais piezoelétricos com a temperatura [4-16].

A tecnologia SAW RFID tem sido utilizada em aplicações de identificação. Dentre as vantagens dos sistemas baseados em RFID está o fato de permitir a operação em ambientes não favoráveis e em produtos onde o uso de código de barras, por exemplo, não é eficiente.

As aplicações mais usuais de RFID podem ser assim relacionadas: nas praças de pedágios, controle de acesso, logística, linhas de montagens, aplicações médicas, transportes aéreos, aplicações biométricas e aplicações financeiras.

Apesar de a utilização mais comum ser em aplicações de identificação, o fato dos materiais piezoelétricos que constituem a etiqueta SAW serem afetados pela temperatura e deformação faz dessa tecnologia uma importante ferramenta para medições em que se almeja desacoplar o transdutor da

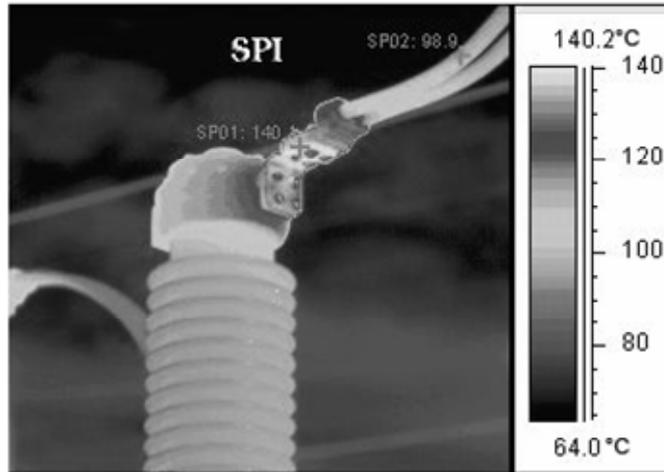


Fig. 1. Pontos quentes observados pela termovisão.

unidade de processamento de sinais, como a medição de temperatura em pontos quentes de subestações, onde a alta tensão inviabiliza a medição através de métodos convencionais.

A medição de temperatura em pontos quentes é crucial para avaliação das condições de operação e para determinação do melhor momento para manutenção por parte da concessionária.

Atualmente, essa medição é realizada por processos de termovisão (Fig. 1) que, além de possuir uma elevada incerteza de medição e alto custo, acarretam elevado período de amostragem.

Com isso, surge a oportunidade de implementar a tecnologia SAW RFID no monitoramento da temperatura desses pontos. A utilização dessa tecnologia, aliada à implementação de uma comunicação via telefonia celular, através de GPRS (*General Packet Radio Service*), permite o monitoramento da temperatura nesses pontos de forma remota e contínua.

Paralelamente ao desenvolvimento de sensores passivos, foram implementadas adaptações e realizados testes com sensores ativos. A diferença principal dos sensores ativos em comparação com os passivos é que os primeiros são providos de uma fonte de alimentação. Pela estrutura construtiva desses dispositivos foram necessárias algumas adaptações para utilização desses sensores no ambiente da subestação. Os testes realizados mostram a viabilidade e as limitações dos dois métodos.

2. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA COM SENSORES PASSIVOS

Devido às características do meio onde a medição de temperatura está inserida, tais como interferência eletromagnética, alta tensão e difícil acesso, optou-se por utilizar uma tecnologia de medição sem fio e passiva. Tal tecnologia é conhecida na literatura por sensores de ondas acústicas superficiais (SAW).

O princípio de funcionamento está fundamentado na teoria do RADAR e na alteração do comportamento de materiais piezoelétricos com a temperatura. A Fig. 2 ilustra o princípio de funcionamento de uma etiqueta SAW.

A medição da temperatura é baseada na alteração de sinais eletromagnéticos. Inicialmente o leitor RFID (transceptor) envia um pulso de sinal eletromagnético para a etiqueta SAW RFID (sensor SAW) e esta converte o pulso eletromagnético em uma onda (vibração) que viaja dentro do material piezoelétrico até encontrar os refletores no sensor SAW. Em seguida a onda retorna dos refletores na forma de um número de pulsos correspondentes ao número de refletores presentes no sensor. Com a variação de temperatura, o material piezoelétrico sofre alteração de tamanho (dilatação/contração) e na velocidade de propagação da onda acústica (a dilatação, por exemplo, faz com que a densidade do material se altere). Estes dois efeitos ocorrem simultaneamente e apresentam uma relação linear com a variação da temperatura. Alterar a velocidade de propagação e as dimensões do sensor faz com que ocorra uma alteração na frequência de ressonância da etiqueta. Quando ocorre a ressonância, a potência do sinal transmitido pelo sensor

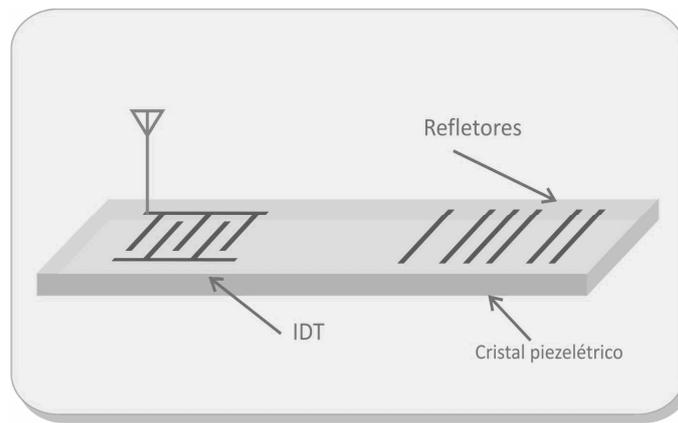


Fig. 2. Princípio de funcionamento da etiqueta SAW.

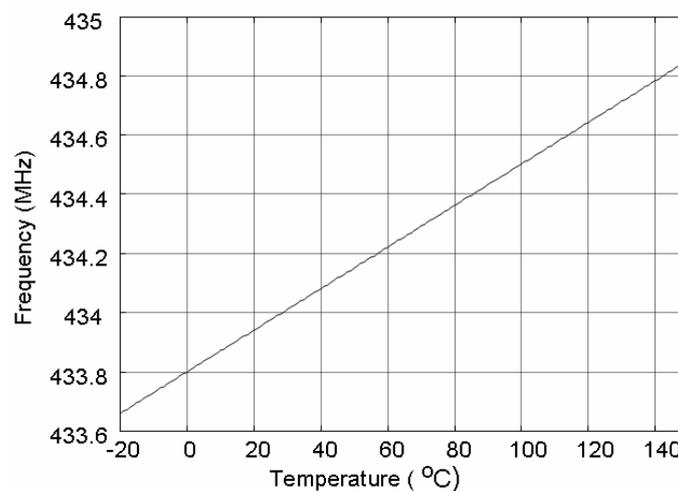


Fig. 3. Variação da frequência de ressonância em função da temperatura.

apresenta a maior intensidade. A linearidade da frequência de ressonância em função da temperatura pode ser observada na Fig. 3. Dessa forma, medir a temperatura consiste na detecção da maior intensidade do sinal transmitido pelo sensor em diferentes frequências, e verificar assim o valor da frequência de ressonância.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados sensores SAW com as seguintes especificações:

- Material: Quartzo
- Frequência de operação: 433 MHz (ISM)
- Banda de Frequência: 1,7 MHz (mínima)
- Impedância de entrada: 50 Ω
- Perda máxima de sinal: 2,5 dB
- Dispositivo: linha de atraso ou ressonador

Em um primeiro momento foi planejado o uso de dois microcontroladores PIC16F877A, um envolvido na transmissão dos dados e o outro na recepção. Após um estudo melhor do sistema, constatou-se que não haveria a necessidade do par de microcontroladores. Desta forma, foi utilizado apenas um microcontrolador PIC16F877A se comunicando com dois dispositivos CC1100, um dedicado à transmissão e outro à recepção, com o objetivo de atender a demanda de medição de 5 μ s exigida pelo sensor.

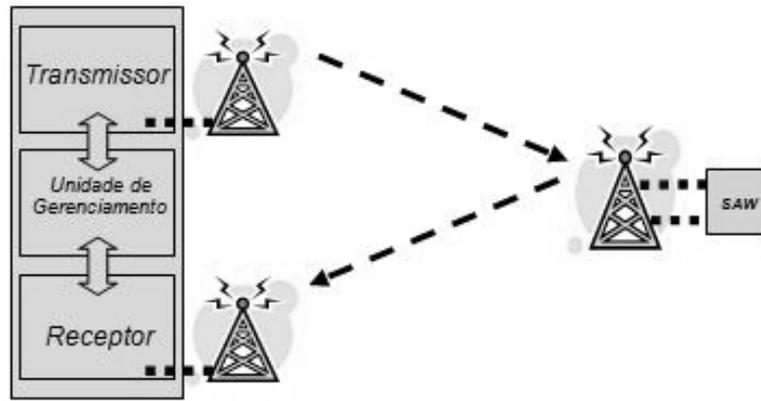


Fig. 4. Topologia do sistema de medição desenvolvido.

Parte fundamental no desenvolvimento do sistema passivo de medição de temperatura é a arquitetura do dispositivo interrogador. Basicamente, um interrogador é composto por um transmissor, um receptor e uma unidade de gerenciamento, conforme Fig. 4.

As maiores dificuldades encontradas durante o desenvolvimento referem-se ao tempo extremamente curto de descarregamento do sensor SAW e à baixa amplitude do sinal refletido.

A questão do tempo foi resolvida com a implementação de um sistema determinístico que garante a amostragem de um ponto na rampa de descarregamento do SAW, a qual carrega a informação referente à frequência de ressonância do sensor naquela temperatura. Esse procedimento é realizado vinte vezes para cada frequência durante a varredura, fazendo-se a média dos valores obtidos.

A intensidade do sinal refletido pelo sensor SAW foi melhorada a partir do estudo de diferentes tipos de antenas e configurações do sistema interrogador. Entretanto, o resultado obtido ainda está aquém do desejado e pode ser melhorado com a amplificação do sinal enviado pelo interrogador.

Com o sistema de medição concluído, diversos testes foram realizados para aperfeiçoamentos e validação do equipamento. Os testes consistiram na medição da temperatura em diversos pontos da faixa de medição e com diferentes configurações do método de varredura da frequência de ressonância, ora variando o número de leituras em cada frequência, ora variando o passo de frequência. Esses testes puderam mostrar a relação tempo de varredura e qualidade dos resultados para as diversas configurações diferentes.

Para obter resultados satisfatórios com relação à obtenção da temperatura com um tempo relativamente pequeno foi estabelecido uma configuração na qual o sensor leva em torno de 2 minutos e 50 segundos para adquirir a temperatura. Este tempo está dentro das expectativas já que as temperaturas nos pontos quentes da subestação variam pouco em um espaço curto de tempo devido à inércia da temperatura nesses pontos. A configuração escolhida realiza, primeiramente, varredura de frequências correspondentes a incrementos de 5°C, com o objetivo de obter o intervalo de interesse dentro da faixa de medição. Dentro desse intervalo, uma nova varredura de frequências correspondentes a incrementos de 1°C é realizada. Para cada valor de temperatura, são realizadas vinte leituras de potência. O valor máximo de potência corresponde à frequência de ressonância e, por conseguinte, à temperatura do ponto de medição.

Para a análise metrológica do sistema de medição desenvolvido, foram mensuradas temperaturas na faixa de (20 a 100)°C, com incrementos de 2°C. Para cada temperatura, foram feitas oito medições. Os resultados obtidos nos testes foram comparados com um termômetro calibrado com resolução de 0,01°C.

A análise metrológica comprovou uma incerteza de medição abaixo de 2°C para o sistema passivo, considerando a correção do erro sistemático que foi de 2,3°C, o que viabilizaria a aplicação do sistema na detecção de pontos quentes em subestações de energia elétrica.

Contudo, o sistema apresentou um baixo alcance de medição. Sendo que o interrogador foi mantido a uma distância de vinte centímetros para a concretização dos testes. Ensaios a distâncias superiores apresentaram resultados insatisfatórios, comprometendo sua aplicabilidade na medição de pontos quentes em subestações.

3. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA COM SENSORES ATIVOS

Paralelamente ao desenvolvimento do sensor passivo e em virtude do baixo alcance do sinal de radiofrequência transmitido pelo sensor SAW, passou-se a estudar alternativas de solução para o problema de medição de temperatura em pontos quentes. Nesse cenário, os sensores ativos e formas de adaptação dos mesmos no ambiente de interesse para proteção do sistema foram estudados.

A principal diferença entre os sensores passivos e os sensores ativos é que os últimos são providos de uma fonte alimentadora de tensão. Essa fonte alimentadora, que tem duração de até cinco anos, concede aos sensores ativos um ganho expressivo no alcance do sinal de radiofrequência, já que o sinal, antes de ser enviado para o receptor, pode ser amplificado.

Para o desenvolvimento do sistema ativo, foram determinadas as seguintes especificações:

- Faixa de medição de 0°C a 120°C
- Exatidão de $\pm 2^\circ\text{C}$
- Resolução de 1°C
- Sem fio
- Bateria de longa duração
- Alcance de 40 m
- Comunicação serial RS232
- Protocolo de comunicação TCP/IP.

Com o sistema ativo foram realizados testes utilizando-se diferentes tipos de antenas, sendo que o melhor resultado foi obtido com antenas planares. Os testes consistiram na medição da intensidade do sinal recebido pelo receptor.

Depois de realizado diversos testes mostrando a grande melhora no alcance utilizando-se sensores ativos e com diferentes configurações de antenas, passou-se às etapas de implementação desse método no problema de medição de pontos quentes em subestações de energia elétrica.

Um software foi desenvolvido em LabVIEW para o acompanhamento dos valores de temperatura medidos e enviados pelos sensores ativos (TAGs). Através desse software foi possível durante os testes acompanhar o recebimento dos dados de temperatura, intensidade de sinal, gráfico das medições e status de cada TAG.

Além dessas informações, o software armazena os dados obtidos em um arquivo para futuros relatórios e interpretação dos dados.

A Fig. 5 mostra uma interface gráfica do software desenvolvido. O software apresenta os parâmetros lidos para cada TAG. Nos testes em laboratório foram utilizados sete TAGs identificados como: 101, 102, 103, 104, 201, 1002, 1003. Essa numeração também é utilizada no protocolo de comunicação de cada TAG, identificando-os unicamente, já que todos operam na mesma frequência.

Além dos testes em laboratório, foram realizados testes em campo com os sensores ativos. Esse tipo de teste era estritamente necessário para determinação das influências do campo eletromagnético presente nas subestações de energia elétrica.

Notou-se que a presença do campo eletromagnético não prejudicou a medição de temperatura dentro do pátio da subestação. Em outras palavras, a intensidade do sinal recebido não sofreu alteração devido ao campo eletromagnético da subestação, quando comparada à intensidade do sinal observada nos testes em laboratório. Pode-se verificar isso analisando a Tabela 1 que mostra três testes realizados em dias distintos sob as mesmas condições, exceto pelo fato que no terceiro teste foi utilizada uma antena planar ao contrário dos outros dois onde se usou uma antena de tipo bastão para a recepção do sinal. Por outro lado, foi observado que os obstáculos físicos são altamente prejudiciais para a transmissão do sinal enviado pelos TAGs. Além disso, a utilização de antena planar determinou grande ganho no alcance do sistema de medição ativo.

Para a instrumentação dos TAGs na linha de transmissão, onde o campo eletromagnético é mais crítico e pode danificar a eletrônica do dispositivo transdutor de temperatura, foram estudadas e desenvolvidas

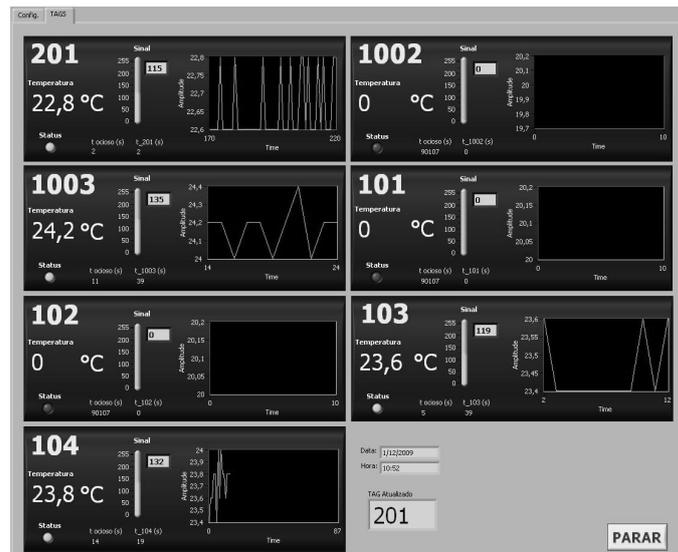


Fig. 5. Software desenvolvido para leituras de temperatura enviadas pelos TAGs.

Tabela 1. Temperatura média registrada pelos sensores.

	Teste 1 : 10:21h às 10:36h	Teste 2 : 13:51h às 14:23h	Teste 3 : 13:50h às 14:22h
Temperatura Ambiente (°C)	25,5	30,4	29,9
Temp. Média Sensor 1 (°C)	27	33	34
Temp. Média Sensor 2 (°C)	28	33	33

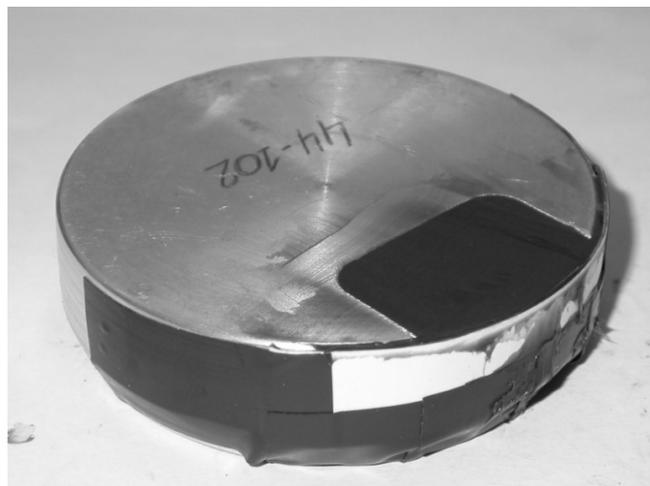


Fig. 6. Proteção dos TAGs desenvolvida para instrumentação em campo.



Fig. 7. Sistema ativo instalado em ponto quente de uma subestação.

algumas formas de proteção. A maior dificuldade nessa etapa foi desenvolver um dispositivo que evite a formação de arcos elétricos entre a linha de transmissão e os componentes eletrônicos dos TAGs, mas que permita, ao mesmo tempo, a transmissão do sinal de radiofrequência dos TAGs para o receptor.

A Fig. 6 mostra uma das configurações desenvolvidas para testes em laboratório e em campo.

As cavidades usinadas nas cápsulas de proteção dos TAGs foram dimensionadas de forma a permitirem a transmissão do sinal de radiofrequência sem, no entanto, prejudicar a característica de gaiola de Faraday, que proporciona uma blindagem elétrica, protegendo os componentes eletrônicos dos TAGs.

Os dispositivos foram testados em laboratório, apresentando boa conformidade com os resultados esperados. Uma redução considerável na intensidade do sinal que chega ao receptor foi observada. Ainda assim, o alcance da transmissão do sinal satisfaz as necessidades do projeto.

Depois de realizados testes em laboratório com o sistema de proteção, partiu-se para testes em campo na linha de transmissão. A Fig. 7 mostra o dispositivo instrumentado em um ponto crítico de aquecimento de uma subestação de energia elétrica.

Foram analisadas nove disposições da antena no campo da subestação e avaliadas as qualidades de recepção de sinal. Três sensores foram colocados um em cada fase da linha de tensão, sendo que o sensor identificado como 102 foi alocado na fase C, o 101 na fase B e por fim o 1002 na A. Logo no início dos testes, percebeu-se que o sensor 1002 parou de funcionar; fato ocorrido pela falta da proteção desenvolvida aos outros dois sensores, a qual oferece proteção contra o campo eletromagnético gerado pela linha de 230kV.

Nos testes de número um ao número três, a antena se encontrava perto da fase B sendo cada vez mais aproximada do sensor 101, de onde se pode perceber que quanto mais estreita a distância entre o transdutor 101 e a antena, melhor é a recepção do sinal desse sensor, enquanto, por outro lado, diminuiu-se gradativamente a intensidade da recepção do sinal recebido do sensor 102. Dos testes quatro ao seis temos a situação inversa à anterior, já que a antena foi disposta perto a fase A da linha de tensão e foi sendo aproximada cada vez mais do sensor 102.

Nos testes de número sete e oito a antena foi colocada a cerca de 20 m do sensor 102, primeiro com sua área de captação perpendicular aos sensores, sendo que não foi possível a captação de sinal provinda do sensor 102, e posteriormente foi colocada com sua região receptora voltada para os sensores, onde conseguiu-se boa recepção de sinal. O teste nove foi realizado com a antena a cerca de 30 m do sensor 102 como mostra Fig. 8, sendo possível somente a captação do sensor 101. Abaixo na figura, na Fig. 9, é possível ver os valores médios de recepção dos sinais oriundos dos sensores 101 e 102, de onde é se concluir, a partir dos testes, que houve uma boa captação sendo possíveis maiores distâncias entre os sensores e a antena.



Fig. 8. Testes do sistema ativo em campo.

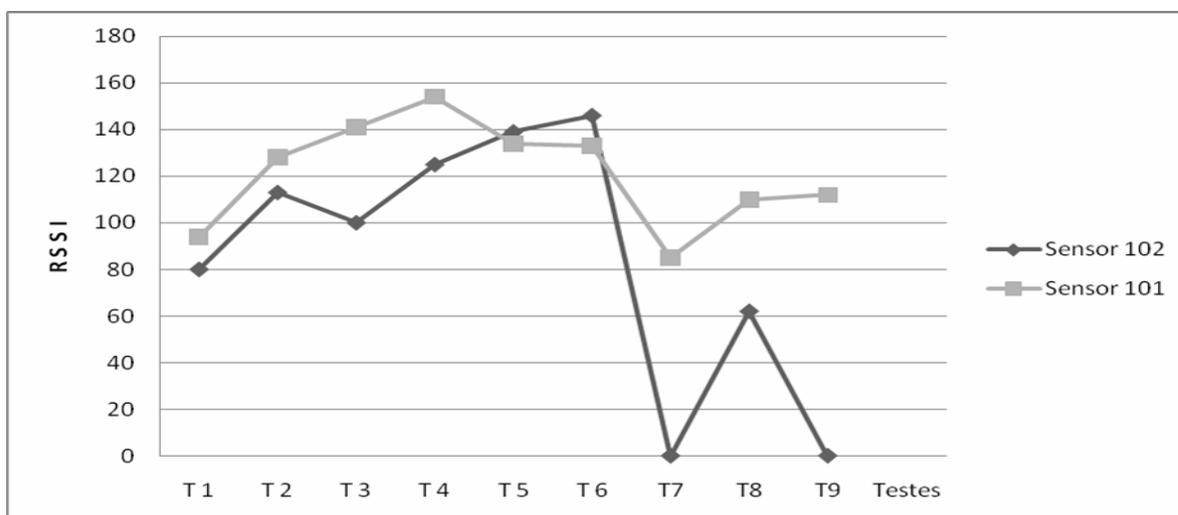


Fig. 9. Valores médios de recepção dos sinais oriundos dos sensores.

4. CONCLUSÕES

O sistema passivo de medição de temperatura foi desenvolvido com sucesso. Os testes realizados mostraram a eficiência do método de medição de temperatura através da tecnologia SAW-RFID. Tal eficiência foi comprovada através da verificação dos valores obtidos pelo sistema desenvolvido, utilizando-se, para tanto, um termômetro calibrado.

As incertezas de medição observadas com o sistema de medição passivo podem ser consideradas insignificantes para a aplicação sugerida, onde as variações de temperatura consideradas críticas são de ordem de grandeza expressivamente maiores. As incertezas de medição obtidas nos testes realizados em laboratório foram inferiores a 2°C.

Embora o desenvolvimento de um sistema passivo de medição de temperatura tenha sido concluído com êxito, o alcance de medição ainda é um problema a ser solucionado para que esse método seja capaz de monitorar pontos quentes de subestações.

Os dispositivos de proteção desenvolvidos para os sistemas ativos de medição de temperatura obtiveram sucesso nos testes realizados em campo. O alcance obtido pelo sinal de radiofrequência enviado pelos TAGs é suficiente para a aplicação do método em campo.

Os dispositivos de proteção foram projetados de forma a permitirem a transmissão do sinal de radiofrequência sem perder a característica de blindagem necessária para instrumentação dos TAGs nas linhas de transmissão.

Os TAGs protegidos foram instrumentados e a antena receptora do sinal enviado foi posicionada à distância de 30 metros. A intensidade do sinal recebido durante os testes indica que essa proximidade é mais do que suficiente para uma medição adequada dos pontos quentes.

Nos testes em campo do sistema ativo, todo o sistema de aquisição do sinal enviado pelos TAGs estava exposto ao tempo, visto que o objetivo era a verificação do funcionamento da proteção e do alcance do sistema desenvolvido. Atualmente, uma proteção adequada para o sistema está sendo desenvolvida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos bolsistas de iniciação científica João Paulo de Souza Oliveira, Lauvir Ramos Neto e Paulo Henrique Zanelatto Damiani pela contribuição no desenvolvimento do projeto e ao Laboratório de Metrologia e Automatização (LABMETRO) da Universidade Federal de Santa Catarina pela infra-estrutura disponibilizada.

REFERENCIAS

- [1] Mitzner, K., Berkenpas, E., Sternhagen, J., Karlgaard, M., Wold, C., Galipeau, D., "A direct digital synthesis system for surface acoustic wave sensors", *Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*, 449-453 (2001)
- [2] Brandl, M., Schuster, S., Scheibelhofer, S., Stelzer, A., "A new anti-collision method for SAW tags using linear block codes", *Proceedings of the 2008 IEEE International Frequency Control Symposium*, 284-289 (2008)
- [3] Shujian, L., Lin, M., Danzhi, W., "A remote wireless identification system based on passive surface acoustic wave (SAW) devices", *Proceedings of the International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 1113-1116 (2005)
- [4] Polh, A., "A review of wireless SAW sensors", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **47**, 317-332 (2000)
- [5] Hamsch, M., Hoffmann, R., Buff, W., Binhack, M., Klett, S., "An interrogation unit for passive wireless SAW sensors based on Fourier transform", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **51**, 1449-1456 (2004)
- [6] Ostermayer, G., Pohl, A., Hausleitner, C., Reindl, L., Seifert, F., "CDMA for wireless SAW sensor applications", *IEEE Proceedings of 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, **2**, 795-799 (1996)
- [7] Nosek, J., "Contribution to the Non-linear Properties of the SAW Transducers," Frequency Control Symposium, Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International, 208-215 (2007)
- [8] Ostermayer, G., "Correlative signal processing in wireless SAW sensor applications to provide multiple-access capability," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **49**, 809-816 (2001)
- [9] Ping, L., Chang-Hong, L., Tao, Y., "Design of UHF synthesizer aperture radar antenna," *Proceedings of 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, 86-88 (2003)
- [10] Hartmann, C., Claiborne, L., "Fundamental Limitations on Reading Range of Passive IC-Based RFID and SAW-Based RFID", *IEEE International Conference on RFID*, 41-48 (2007)
- [11] Madou, M.J., *Fundamentals of Microfabrication: the Science of miniaturization*, Boca Raton, Florida, CRC Press (2002)
- [12] Richards, M.A., *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, McGraw-Hill Companies, Inc. (2005)

- [13] Mahafza, B.R., Elsherbeni, A.Z., *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, Boca Ranton, Florida, CRC Press (2004)
- [14] Pelesko, J.A., Bernstein, D.H., *Modelling MEMS and NEMS*, Boca Ranton, Florida, CRC Press (2003)
- [15] Puccio, D., Malocha, D., Saldanha, N., “Multiple access SAW sensors using orthogonal frequency coding”, *Sensors*, IEEE, 723- 726 (2005)
- [16] Ostermayer, G., Pohl, A., Reindl, L., Seifert, F., “Multiple access to SAW sensors using matched filter properties”, *IEEE Proceedings of Symposium on Ultrasonics*, **1**, 339-342 (1997)

TEMPERATURE MEASUREMENT IN HOT SPOTS OF POWER SUBSTATIONS USING PASSIVE AND ACTIVE SENSORS

Abstract – In many applications in the field of metrology is not trivial direct connection of the sensor element with the respective unit signal processing of the measurement system. We can cite as an example the measurement of hot spots in electrical substations due to the high electrical potential. Thinking to solve this problem two alternatives were studied, using an active sensor and other passive. For passive was used the RFID technology SAW. This technology is widely used in identification systems, but its application in the field of metrology is innovative. The temperature variation causes changes in the characteristics of piezoelectric material of the SAW label, among them the resonance frequency. The problem of temperature measurement based on the identification of the resonant frequency of the SAW tag in a given time. In its aim to achieve higher ranges was also studied the application of active sensors to solve the problem.

Keywords – Hot spots, RFID, SAW, Actives sensors, Passive sensors.