



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

1.

GRUPO – I GGH

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DINÂMICO DE ENTRE-FERRO DE HIDROGERADORES POR ULTRASSOM

**Julio C. Adamowski(*)
E. Politécnica da USP**

**Nilson N. Franceschetti
E. Politécnica da USP**

**Hamilton H. Tiba
CESP**

**Paulo Roberto D. Oda
CESP**

RESUMO

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor de distância de entre-ferro de hidrogeradores que utiliza o tempo de voo de uma onda ultrassônica para determinar a distância. Esse medidor tem um par de transdutores retangulares de ultrassom com dimensões reduzidas (4,5 x 8,0 mm), desenvolvidos para possibilitar sua instalação em canais de ventilação do estator. O transdutor é do tipo piezo-compósito para ter alto desempenho em emissão e recepção no ar e tem frequência central de 250 kHz. A correlação entre o tempo de voo da onda de ultra-som e a distância do entre-ferro depende da temperatura do ar que altera a velocidade de propagação da onda e da velocidade do ar que é movimentado pelo rotor, pois os transdutores são montados um ao lado do outro o que produz um percurso da onda maior do que o dobro da distância do entre-ferro devido ao ângulo formado pela distância entre os centros dos transdutores e a distância do entre-ferro. A velocidade de propagação da onda é corrigida a partir da medição da temperatura do ar num ponto próximo ao transdutor de ultra-som. O efeito da velocidade do ar na região do entre-ferro é compensado medindo-se o tempo de voo no sentido do fluxo de ar e no sentido oposto, cancelando esse efeito. O disparo do pulso de ultra-som, o ajuste do ganho, e a medição do tempo de voo são executados por um microcontrolador que usa um contador de 16 bits com clock de 7,37 MHz proporcionando uma resolução de aproximadamente 0,015 mm na medição da distância do entre-ferro. Foram realizados testes preliminares desse medidor na Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. A distância do entre-ferro é medida numa taxa de 5 kHz o que produz uma medição de distância a cada 10 mm do perímetro do rotor, A instalação dos transdutores de ultra-som no canal de ventilação do estator é muito simples, pois o par de transdutores é montado numa haste que penetra no canal de ventilação até uma posição pré-determinada por um batente que é utilizado para a fixação da haste no estator. Os resultados obtidos nos primeiros testes do medidor apresentam um ruído que corresponde a uma variação de $\pm 0,1$ mm, mostrando que há uma boa repetibilidade. Encontra-se em estudo a transformação do protótipo em um produto para usinas hidrelétricas.

PALAVRAS-CHAVE

Palavra-Chave, medidor de entre-ferro, ultrassom, tempo de voo, sensor de distância, hidrogerador

1.0 - INTRODUÇÃO

A medição dinâmica do entre-ferro de um hidrogerador é usada para acompanhar o seu desempenho durante operação e auxilia nas tomadas de decisões sobre manutenção [1].

Esse trabalho apresenta o estudo de viabilidade de um medidor de distância de entre-ferro que utiliza o tempo de voo de uma onda ultra-sônica para determinar a distância. A patente [2] descreve um medidor dinâmico de entre ferro utilizando transdutores (emissor/receptor) de ultrassom montados no rotor do hidrogerador, na região entre dois pólos. O hardware de condicionamento de sinais de emissão e recepção está fixado ao rotor e há comunicação, através de transformadores, com a parte estática do hidrogerador. Essa estratégia permite a utilização de transdutores de ultrassom com grandes dimensões. No presente trabalho, foram desenvolvidos transdutores especiais, com dimensões reduzidas, para permitir a montagem nos canais de ventilação do estator. O transdutor de ultrassom é retangular, com dimensões reduzidas (4,5 x 8,0 mm), fabricados com a técnica de piezo-compósito para ter alto desempenho em emissão e recepção no ar e tem frequência central de 250 kHz.

(*) EPUSP-PMR, Av. Prof. Mello Moraes, n° 2231 – CEP 05.508-030 São Paulo, SP – Brasil
Tel: (+55 11) 3091-5120 – Fax: (+55 11) 3091-5722 – Email: jcadamow@usp.br

A correlação entre o tempo de vôo da onda de ultra-som e a distância do entre-ferro depende da temperatura do ar que altera a velocidade de propagação da onda e da velocidade do ar que é movimentado pelo rotor, pois os transdutores são montados um ao lado do outro o que produz um percurso da onda maior do que o dobro da distância do entre-ferro devido ao ângulo formado pela distância entre os centros dos transdutores e a distância do entre-ferro. A velocidade de propagação da onda é corrigida a partir da medição da temperatura do ar num ponto próximo ao transdutor de ultra-som. Os transdutores podem operar na faixa de 0 a 100°C de temperatura.

2.0 - DESCRIÇÃO DO MEDIDOR DE ENTRE-FERRO

O medidor de entre ferro é baseado na medição do tempo de vôo de uma onda ultrassônica que se propaga de um transdutor (emissor) fixado no canal de ventilação do estator, reflete na superfície do rotor e retorna a um outro transdutor (receptor) de ultrassom fixado ao lado do emissor, conforme mostrado na Figura 1. O intervalo de tempo entre a emissão e a recepção é correlacionado com a distância do entre-ferro através da velocidade de propagação do som no ar numa temperatura que é medida simultaneamente na região da propagação da onda ultrassônica. O disparo do emissor e a recepção da eco refletido no estator, bem como a cronometragem do tempo de propagação é feito por um sistema microprocessado que executa medições a uma taxa programada, Esse sistema se comunica com um microcomputador através de uma porta serial (RS 232). Um programa de comunicação no microcomputador permite a programação do sistema de ultrassom e a recepção dos resultados das cronometragens dos tempos de vôos para processamento posterior.

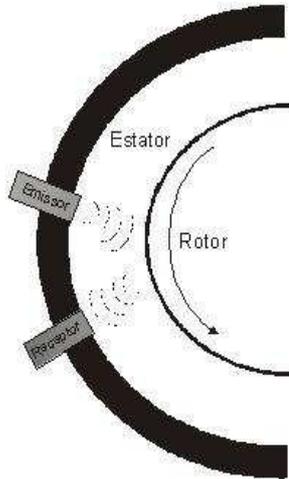


FIGURA 1 - desenho esquemático da montagem dos transdutores de ultrassom.

2.1 TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO

Os transdutores de ultrassom utilizados nesse trabalho são piezelétricos e têm características de resposta em frequência banda larga, operando com frequência central de 250kHz. Esses transdutores operam como emissor e receptor e foram construídos com material piezocompósito visando aumentar o fator de acoplamento eletromecânico e diminuir os modos de vibração laterais.

A combinação de um material piezelétrico com um polímero é chamada de material piezelétrico compósito, e apresenta propriedades superiores às cerâmicas piezelétricas tradicionais (3). A Figura 2 mostra que o coeficiente de acoplamento eletromecânico apresenta um valor acima de uma cerâmica de PZT-5A para uma grande faixa de fração de volume. A adição de polímero diminui a impedância acústica, permitindo uma maior transmissão de energia do transdutor para o meio e vice-versa. O aumento do coeficiente de acoplamento eletromecânico permite uma maior conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa. Esses dois fatores contribuem para que sejam construídos transdutores de ultra-som de banda-larga com alta sensibilidade.

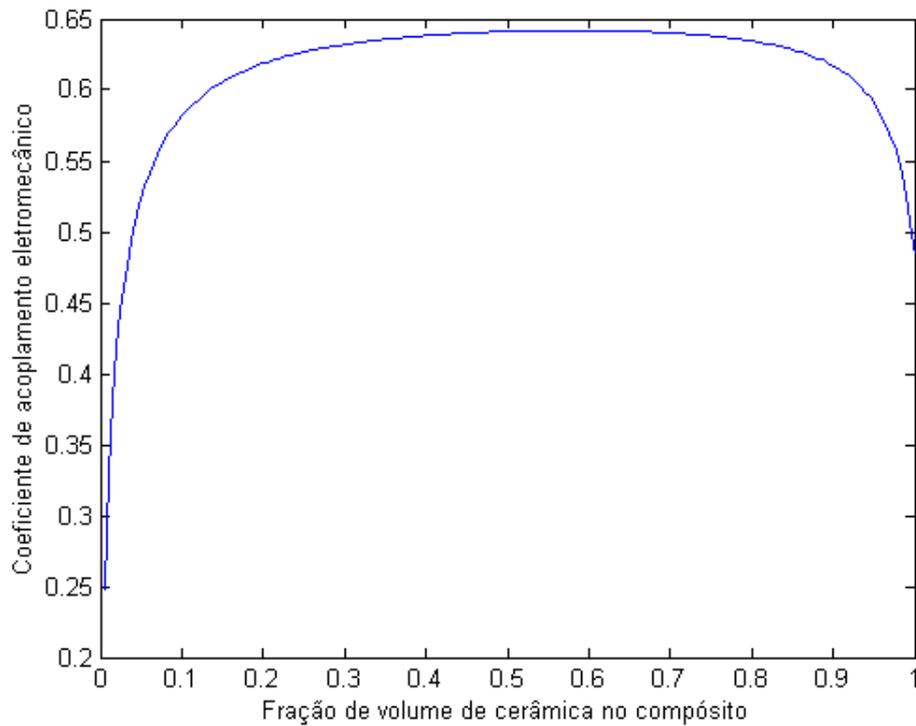


FIGURA 2 - Coeficiente de acoplamento eletromecânico para um material piezelétrico compósito 1-3.

O método de fabricação mais utilizado em pequena escala é a chamada técnica “dice-and-fill” (4) e está ilustrada na Figura 3. Neste processo de fabricação, é utilizado um disco de corte para criar os vãos na cerâmica piezelétrica. Primeiramente é feito o corte nas duas direções, e depois é acrescentado polímero aos vãos criados pelos discos de corte. Após a cura do polímero, a parte de baixo do material é retirada através de uma retifica plana.

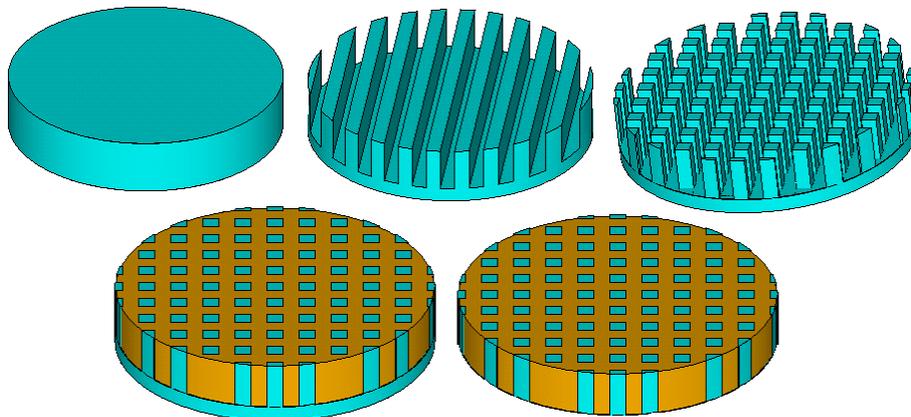


FIGURA 3: Método de fabricação “dice-and-fill” de materiais piezelétricos compósitos 1-3.

As fotografias da Figura 4 mostram a face de emissão e recepção e a lateral do transdutor fabricado. Nesse transdutor foi utilizada uma fração de volume de piezocerâmica de aproximadamente 60%. Na vista lateral, a altura do elemento piezelétrico é de 5 mm. Essa altura está relacionada ao modo de vibração de espessura do piezocompósito que é de aproximadamente 250 kHz. A face do transdutor tem dimensões de 4,5 x 8,0 mm.

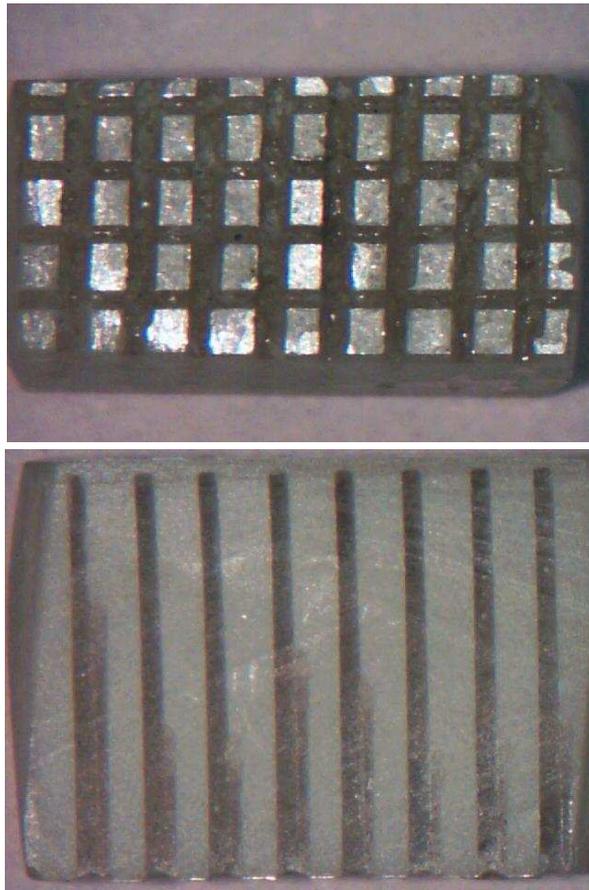


FIGURA 4 - fotografia do transdutor piezocompósito (vistas frontal e lateral).

2.2 HARDWARE ELETRÔNICO

O medidor possui um circuito pulsador que excita o transdutor de ultra-som com um pulso negativo de 400Vcc com duração de $1\mu\text{s}$, operando no modo transmissão-recepção. Um pré-amplificador com ganho de 40 dB é utilizado para pré-amplificar o sinal do transdutor receptor, e posteriormente o sinal é amplificado por um outro circuito amplificador de até 40dB. O disparo do pulso de ultra-som, o ajuste do ganho, e a medição do tempo de vôo são executados por um microcontrolador (Rabbit 2000). O intervalo de tempo é medido por um contador de 16 bits. Ao emitir o pulso de ultra-som, o contador é disparado e ao receber o eco proveniente do rotor o contador é travado. A contagem de tempo é feita com um clock de 7,37 MHz proporcionando uma resolução de aproximadamente 0,015 mm na medição da distância do entre-ferro.

A Figura 5 mostra um diagrama de blocos das ligações elétricas do medidor de entre-ferro.

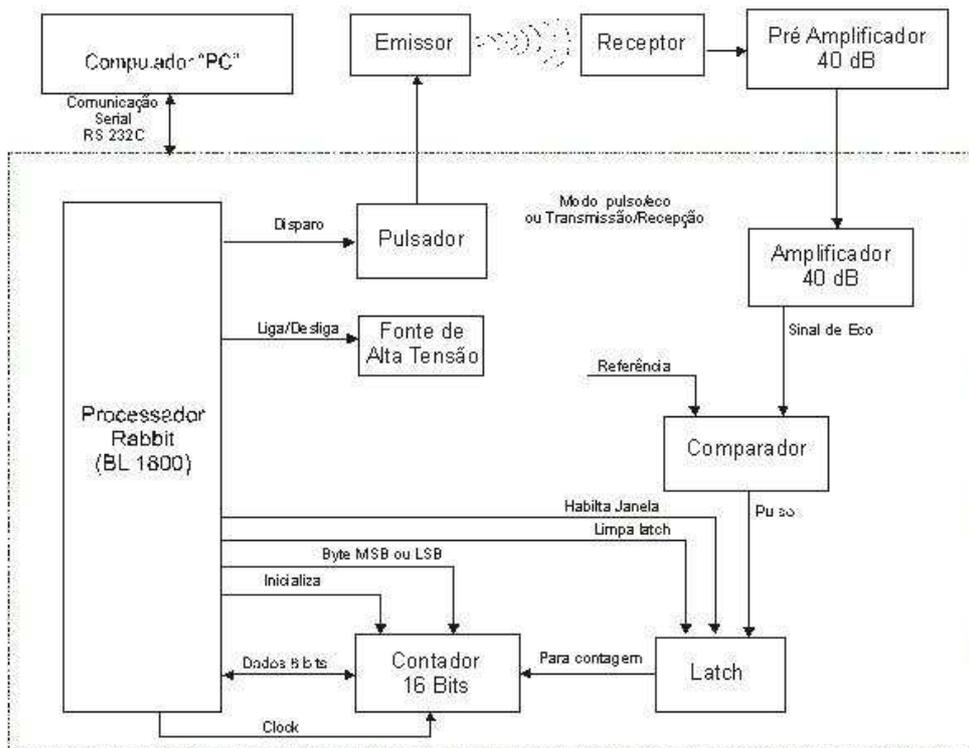


FIGURA 5 – diagrama de blocos do circuito elétrico.

A Figura 6 apresenta uma fotografia da eletrônica do medidor de entre-ferro



FIGURA 6 - foto da eletrônica do medidor de entre-ferro por ultrassom

3.0 VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS

Foram realizados testes desse medidor na Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. A distância do entre-ferro é medida numa taxa de 5 kHz o que produz uma medição de distância a cada 10 mm do perímetro do rotor, na rotação nominal. Nesse hidrogerador cujo rotor tem 12 m de diâmetro, foram feitas 3770 medições que corresponde a uma volta completa. Os valores das medições são transferidos para um microcomputador via interface serial. Os testes foram feitos em todas as condições de operação do hidrogerador. Verificou-se que não há influência do campo magnético no desempenho do medidor por ultra-som.

A instalação dos transdutores de ultra-som no canal de ventilação do estator é muito simples, pois cada transdutor é montado numa haste que penetra no canal de ventilação até uma posição pré-determinada por um batente que é utilizado para a fixação da haste no estator. Os transdutores de ultra-som desenvolvidos apresentam alta sensibilidade apesar do tamanho reduzido. A Figura 7 mostra uma foto da instalação dos transdutores (emissor e receptor) nos canais de ventilação do estator, e o pré-amplificador de sinais utilizado.

O principal objetivo dos ensaios em Ilha Solteira foi verificar a influência do campo magnético no comportamento dos transdutores de ultra-som. Verificou-se que não interferência significativa do campo magnético, mas por outro lado, houve uma grande influência do fluxo de ar entre o rotor e o estator, pois o rotor tem uma velocidade tangencial de 53,9 m/s, na rotação nominal. Nos primeiros ensaios realizados, o emissor foi instalado num canal de ventilação e o receptor num outro canal distante de 60 mm. O efeito do fluxo de ar aumentou o tempo de propagação fazendo com que os sinais recebidos ficassem fora da janela de medição. Isso foi verificado quando a rotação foi reduzida a 20% da rotação nominal e os sinais apareceram claramente. O efeito do fluxo de ar foi corrigido em laboratório, utilizando-se duas medições, uma no sentido do fluxo e outra no sentido oposto ao fluxo. Além do efeito do fluxo, deve-se considerar o efeito da temperatura que é corrigido a partir da medição da temperatura. Na temperatura de 60 °C a velocidade de propagação no ar é de 366 m/s.

A Figura 8 mostra uma foto da eletrônica montada numa bancada no lado externo à instalação do hidrogerador,



FIGURA 7 - foto da instalação dos transdutores de ultra-som.



FIGURA 8: montagem dos equipamentos usados no ensaio do medidor de entre-ferro

Os principais resultados obtidos no ensaio realizado na máquina 02 de Ilha Solteira, em 11/01/2008, são mostrados nas Figuras 9, 10 e 11. A Figura 9 mostra os resultados obtidos com a máquina a 20% da rotação nominal. Verifica-se que há ruídos que são facilmente filtrados e que para cada pólo há cerca de 50 medições com

pequenos desvios. O eixo vertical apresenta o valor da contagem do número de ciclos do clocks de 7,37 MHz, na janela do tempo de vôo e o eixo horizontal apresenta o número da leitura realizada.

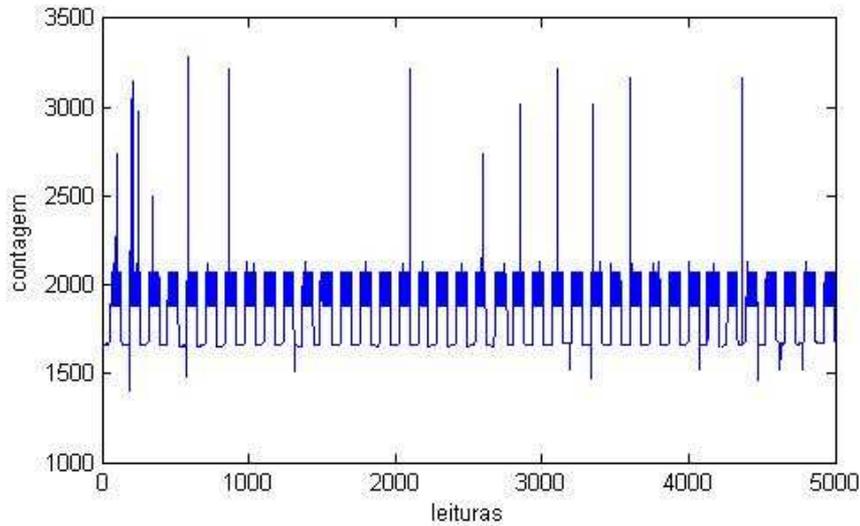


FIGURA 9 - medições do entre-ferro com 20% da rotação nominal.

A Figura 10 apresenta detalhes entre as leituras 2000 e 2500. Os valores de contagens entre 1650 e 1670 representam a distância do entre-ferro. Acima de 1680 o valor do entre-ferro aumenta rapidamente e entra na região entre dois pólos. Os valores de contagem acima de 1870 e abaixo 2070 representam o limite de contagem do cronômetro. Dessa forma, os valores válidos situam-se na faixa entre 1650 e 1670.

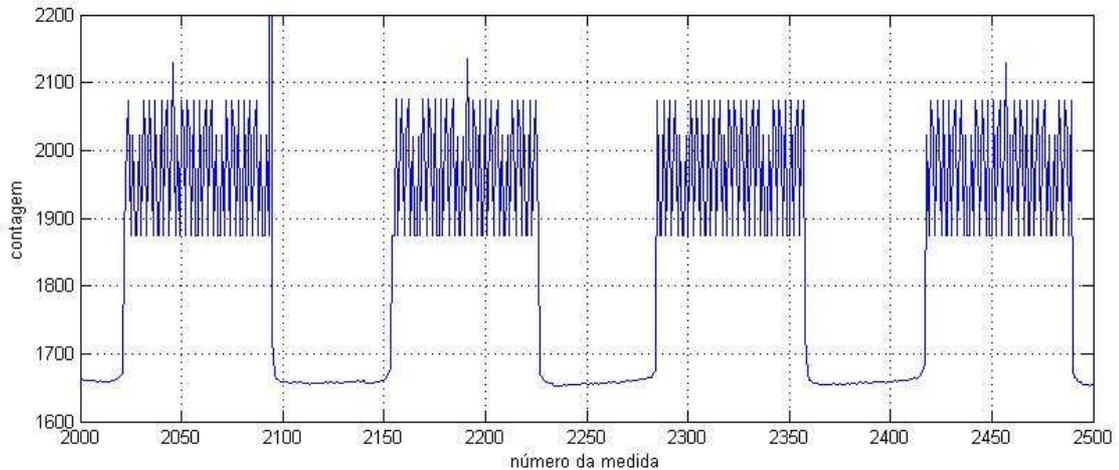


FIGURA 10 - detalhes das medições de entre-ferro.

A Figura 11 mostra os sinais processados e uma medição média do tempo de vôo de cada pólo. Nesse ensaio foram medidos 38 pólos. O valor médio obtido é de 1660,7 contagens, com um desvio padrão de 3,7 contagens. Nesse caso, cada contagem equivale a aproximadamente 0,015 mm.

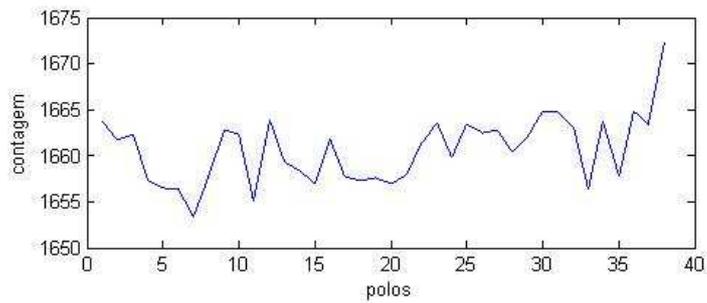


FIGURA 11 - valor relativo do entre-ferro para cada pólo medido.

4.0 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos conclui-se que a técnica de medição de entre-ferro com ultrassom é viável do ponto de vista de repetibilidade das medições do tempo de vôo da onda de ultrassom. Foi possível projetar e fabricar transdutores com pequenas dimensões e elevada sensibilidade. A miniaturização permitiu a instalação dos transdutores no canal de ventilação do estator que tem altura nominal de 5 mm. As interferências eletromagnéticas não foram significativas, mesmo com o hidrogearador a plena carga. Durante o ensaio verificamos a forte influência do fluxo de ar que foi corrigida em laboratório utilizando-se medições no sentido do fluxo e no sentido oposto ao fluxo. A instalação dos transdutores de ultrassom no estator do hidrogearador foi muito simples e demandou alguns minutos de trabalho. A detecção do tempo de vôo com travamento do cronômetro foi feita utilizando-se um comparador com limiar fixo. Essa detecção poderá ser melhorada utilizando-se a aquisição digital do sinal e uma detecção com limiar variável ou com outras técnicas de processamento digital de sinais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TALAS, P., Toom, P., "Dynamic Measurement and Analysis of Air Gap Variations in Large Hydroelectric Generators", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-102, n. 9, p. 3098-3106, 1983.
- (2) CHURCHILL, T.L., Ross, J.M., "Dynamic Air Gap Measuring Device for use with Rotating Electrical Machinery", United States Patent, n. 4704906, November, 1987.
- (3) GURURAJA, T. R., Schulze, W. A., Cross, L. E., Newnham, R. E., Auld, B. A., Wang, Y. J., "Piezoelectric Composite Materials for Ultrasonic Transducer Applications. Part I: Resonant Modes of Vibration of PZT Rod-Polymer Composites", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, v. 32, n. 4, p. 481-498, 1985.
- (4) SMITH, W. A., "The Role of Piezocomposites in Ultrasonic Transducers", 1989 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, p. 755-766, 1989.