

# UM NOVO SENSOR DE PROXIMIDADE CAPACITIVO IMUNE A “RUNOUT” ELÉTRICO

J. Lin<sup>1</sup>

M.R. Bissonnette<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gerente de Produto, Aplicações Industriais, VibroSystM Inc., Longueuil, QC, Canada, J4G 2J4

<sup>2</sup>Gerente de Vendas, Div. de Monitoramento das Condição da Máquina, VibroSystM Inc., Longueuil, QC, Canada, J4G 2J4

## RESUMO

Um novo sensor utilizando a comprovada tecnologia capacitiva foi projetado de modo a superar algumas das limitações técnicas dos sensores de correntes parasitas (indutivo ou “eddy-current”). Um conjunto de testes comparando o desempenho do sensor capacitivo vs. sensores de proximidade de correntes parasitas foi conduzido pela medição do “runout” elétrico em baixa rotação no rotor de um grande motor. Os resultados mostram que o sensor de proximidade capacitivo é imune a alguns dos efeitos que influenciam o sinal de vibração de um sensor de correntes parasitas. Para casos em que alto “runout” elétrico ou arranhamento na superfície do eixo do rotor forem uma preocupação, o sensor de proximidade capacitivo oferece uma forte alternativa à sensores de correntes parasitas para medições precisas de vibração. Para o fabricante de máquinas, isto poderia resultar em processos e custos reduzidos de fabricação. Para o usuário final, poderia significar lucros aumentados, devido a reduzidos tempos de parada de máquinas.

## 1. INTRODUÇÃO

Para fornecer efetiva proteção contra vibração das máquinas, uma medição precisa e confiável deve ser efetuada pelo transdutor de vibração. Para máquinas elétricas de grande porte que tenham baixos níveis de transmissão de vibração de rotor para mancal, o transdutor chave é o sensor de proximidade. Sensores de proximidade tipo corrente parasita tem sido padrão de medição de proximidade sem contato por mais de 35 anos. Entretanto, eles sempre possuíram certas limitações inerentes de projeto que permaneceram sem solução.

Um novo sensor de proximidade foi projetado que supera algumas limitações técnicas dos sensores de correntes parasitas. Comprovada tecnologia capacitiva é aplicada para eliminar os problemas que contaminaram o uso de sensores de correntes parasitas. O desempenho do novo sensor capacitivo e de um sensor de corrente parasita são comparados e discutidos, baseados nos testes de “runout” elétrico de baixa rotação efetuados numa fábrica de grandes motores.

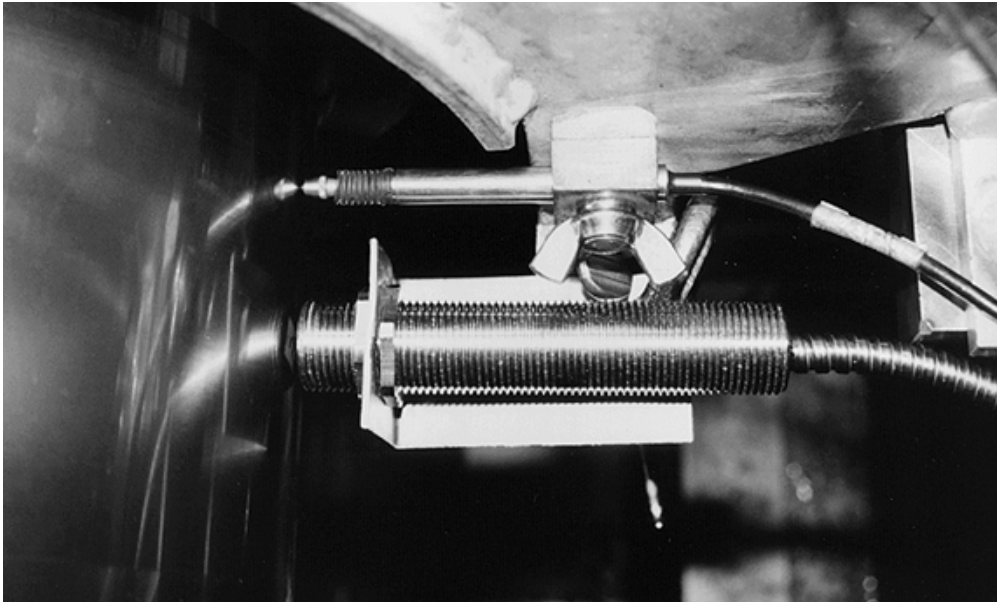
## 2. COMPARAÇÃO DA TECNOLOGIA CAPACITIVA VS. CORRENTE PARASITA

Os sensores de corrente parasita operam através de um princípio de operação magnética. Um sinal de alta frequência é transmitido pelo driver do sensor (oscilador-demodulador) à ponta do sensor. A bobina na extremidade do sensor irradia o sinal no alvo observado como um campo magnético. Quando o alvo condutivo aproxima-se da ponta do sensor, as correntes parasitas são geradas, o que diminui a força do campo magnético que, em troca, enfraquece a saída CC do drive do sensor. O drive do sensor lineariza esta saída CC sobre certa faixa de medição. Este sinal linearizado tem ambos os componentes CA e CC. O componente CA representa o movimento do alvo relativo à ponta da sonda (i.e. vibração relativa) enquanto que o componente CC representa o espaço médio entre o alvo e o sensor. Enquanto ambos componentes de sinal fornecem informações valiosas, é o componente CA que é de interesse para a medição de vibração.

Os sensores de proximidade capacitivos operam através de um princípio de campo elétrico. Um campo elétrico é criado no espaço entre a ponta do sensor e o eixo do rotor. Enquanto o espaço entre o alvo e a ponta do sensor muda, a corrente capacitiva modulada é medida e linearizada. Deste modo, o parâmetro-chave do qual esta medição de vibração depende é a capacitância do espaço. A tecnologia de medição capacitiva é independente do campo magnético, das irregularidades da superfície do alvo e das propriedades metalúrgicas do alvo.

## 3. NÍVEIS PERMISSÍVEIS DE “RUNOUT” ELÉTRICOS E MECÂNICOS

Os fabricantes de máquinas rotativas devem muitas vezes satisfazer especificações muito firmes para “runout” elétrico e mecânico permissível para eixos de rotor. A Norma API-670 requer que “um runout elétrico e mecânico combinado total não exceda 25% do máximo permitido à amplitude de vibração pico-a-pico, ou  $6\mu\text{m}$  (0,25 mil), qualquer que seja o maior”. Já que alguns usuários estabelecem vibrações máximas de amplitudes tão baixas quanto  $20\mu\text{m}$  (0,8 mils), o runout permissível pode ser tão baixo quanto  $5\mu\text{m}$  (0,2 mils). Mesmo com poli-



*Figura 1 – Arranjo do Teste do Sensor – Sensor de proximidade capacitivo mostrado abaixo do sensor LVDT, observando o movimento de eixo do rotor.*

mento por diamante do eixo de rotor, os níveis de runout assim tão baixos podem ser muito difíceis para fabricantes de máquinas alcançarem.

#### **4. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO DE TESTE**

A *Figura 1* acima mostra o arranjo do sensor. Os sensores utilizados foram um sensor LVDT, um sensor de proximidade de corrente parasita e um sensor de proximidade capacitivo PCS-102. Os sensores capacitivo e de corrente parasita foram alternadamente fixados com o sensor LVDT para observar o movimento do eixo de rotor (o qual foi montado por torno). Os sensores foram instalados para medir o runout mecânico e elétrico do eixo de um rotor de 4 pólos montado em um torno. As leituras dos sensores foram tomadas ao longo da circunferência do eixo próximo ao mancal do rotor, onde sensores de proximidade normalmente são instalados. Deve-se notar que o eixo de teste não foi usinado no torno de teste, então o nível de runout mecânico é mais alto do que deveria ser normalmente. Um suporte foi usado para fixar o sensor LVDT e os sensores de proximidade firmemente no lugar.

O LVDT é um transdutor que está sempre em contato com a superfície do eixo do rotor. Enquanto o rotor gira, ele traça completamente o perfil mecânico atual da circunferência do rotor. Os dois sensores de proximidade, sendo sensores de não-contato, também procuram detectar o movimento mecânico do rotor. Entretanto, os sensores de proximidade devido a seu projeto de não-contato incorrem em alguns graus de erro em suas medições de movimento

do rotor. A diferença entre leituras tomadas pelo transdutor LVDT e cada sensor de proximidade é, por definição, o nível de *runout elétrico* para aquele sensor de proximidade.

#### **5. PROCEDIMENTOS DO TESTE**

Um ponto de referência foi marcado num ponto da circunferência do rotor. O rotor foi girado a baixa velocidade (7 RPM). Sob condições diferentes, um conjunto de medições foi tomado com o sensor de corrente parasita combinado com o sensor LVDT e um conjunto de medições foi tomado com o sensor capacitivo combinado com o mesmo sensor LVDT. Já que o LVDT estava próxima dos sensores de proximidade, a diferença em leituras forneceria o nível de runout elétrico para cada tipo de sensor de proximidade. As medições foram feitas através de uma rotação nas seguintes condições:

1. Sensor de corrente parasita observando eixo não polido.
2. Sensor capacitivo observando eixo não polido.
3. Sensor de corrente parasita observando eixo polido.
4. Sensor capacitivo observando eixo polido.

É sabido que para muitos espaços pequenos entre o sensor de proximidade capacitivo e o eixo do rotor, óleo do mancal que pode entrar neste espaço pode afetar as leituras do sensor capacitivo. Entretanto, outros sensores empregando a mesma tecnologia de medição capacitiva tem sido usados por anos em ambientes similares, sem qualquer erro de

medição significativo. Este teste de sensibilidade à filme de óleo é mais difícil de simular e poderia idealmente ser obtida das condições de operação real. Os Autores esperam que os resultados do teste de sensor do monitoramento de um motor sob condições de operação verdadeiras seja completado antes da apresentação do artigo técnico e apresentado na conferência.

Além disso, pretendeu-se arranhar a superfície do eixo observado para testar a sensibilidade dos dois sensores de proximidade a este tipo de irregularidade no passo observado. Já que um arranhamo existente foi encontrado no eixo, isto foi usado para comparação.

## 6. HIPÓTESES

O fabricante do sensor de proximidade capacitivo afirma que seu sensor é imune ao runout elétrico e reduz enormemente os erros que ocorrem de arranhamos e outras irregularidades mecânicas na superfície do eixo. Os testes foram criados para provar estas afirmações.

## 7. RESULTADOS

Um sumário dos resultados do teste é fornecido nas Figuras 2 a 5. Para cada condição, três conjuntos de medições foram feitas para uma revolução do eixo. A inspeção visual não mostrou discrepâncias significativas entre as leituras de cada conjunto de três, por isto apenas o primeiro conjunto de leituras para cada condição de teste é apresentada a seguir.

### Condição 1 – Sensores de proximidade observando eixo de rotor não polido -

Foi decidido testar as medições dos sensores em um eixo não polido. Os resultados do sensor capacitivo e de corrente parasita são dados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

O sensor de corrente parasita (Figura 2) exibe um nível pico-a-pico de runout elétrico de 0,54 mils (13,7 $\mu$ m) que é razoavelmente típico para um eixo não polido. A forma de onda do sinal do sensor de corrente parasita tem a mesma forma geral do sinal LVDT, mas parece retardar o movimento do eixo. Parece também ser significativo o ruído elétrico do sinal do sensor de corrente parasita. A fonte deste ruído elétrico pode ser devida tanto a irregularidades mecânicas na superfície do eixo como impurezas metalúrgicas no material do eixo. Qualquer que seja a causa exata, nós podemos ver que o nível de runout elétrico é razoavelmente alto para a superfície de eixo do rotor não polido.

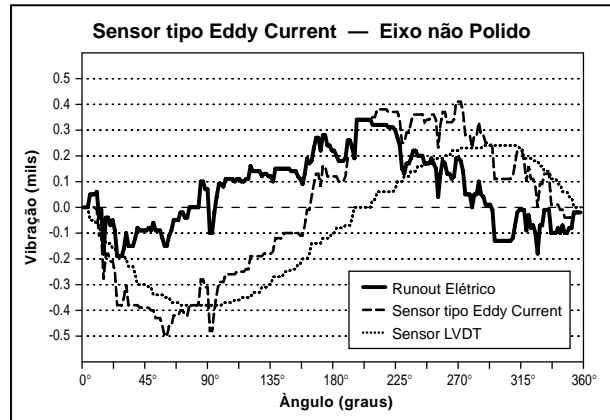


Figura 2 – Resultados do teste para sensor de proximidade de corrente parasita observando eixo de rotor não polido.

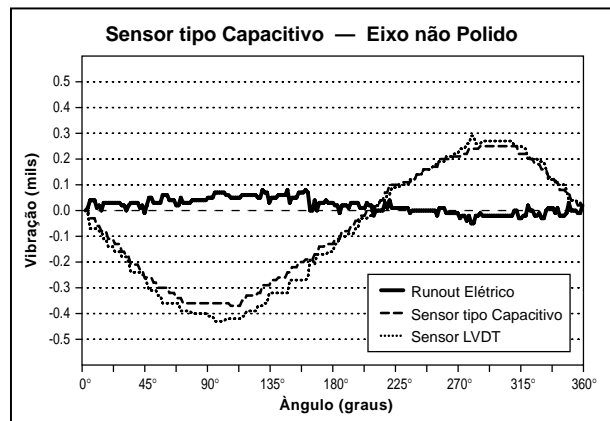


Figura 3 – Resultados do teste para sensor de proximidade capacitivo observando eixo de rotor não polido.

Por outro lado, o sensor capacitivo (Figura 3) rastreia o movimento do eixo bem perto e sem o atraso de fase exibido pelo sensor de corrente parasita. Isto se deve ao fato de que uma maior ponta no sensor capacitivo (tipicamente 5 vezes a área da superfície da ponta de um sensor de corrente parasita de 8mm de diâmetro), “vê” uma maior porção do eixo e é capaz de não ser sensibilizado para quaisquer irregularidades da superfície mecânica. Além disso, o sensor capacitivo não tem de ser calibrado para o material específico do eixo – sua tecnologia de medição trabalha igualmente com todos os alvos condutores e semicondutores. Deste modo seu sinal é imune a quaisquer diferenças metalúrgicas que possam existir na superfície do eixo.

O aspecto mais notável da medição do sensor de proximidade capacitivo é que o sensor exibe um nível pico-a-pico de runout elétrico de apenas 0,13 mils (3,3 $\mu$ m, grosseiramente um quarto da leitura de corrente parasita). Isto passaria nas especificações de runout (em particular na Norma API-670) sem a necessidade de polimento por diamante. Deste modo, leituras falsas e suas caras conseqüências podem ser evitadas.

## Teste do Arranhamento

Pretendeu-se conduzir um teste de sensibilidade de arranhamento da superfície e comparar a resposta dos dois sensores a esta anomalia. Os arranhamentos na superfície de um rotor podem induzir a erro significativo nas leituras de sensores de corrente parasita e são altamente indesejáveis na medição de vibração sem contato. Durante o andamento do teste, foi notado um arranhamento já existente a 90° do marcador de referência no eixo do rotor. Não houve medição de profundidade deste arranhamento, mas um dos experimentadores arranhou-o com a unha e não pôde sentir o sulco no arranhamento - isto é, o arranhamento estava muito raso.

Decidiu-se que este arranhamento seria suficiente para comparar a sensibilidade dos dois sensores. O sensor de corrente parasita capta este arranhamento como pode ser visto no profundo pico negativo de aproximadamente 0,20 mil (5,1µm) no sinal de corrente parasita a 90° (Figura 2). Por outro lado, nenhuma discrepância significativa é perceptível no sensor capacitivo. Isto pode ser devido à ponta maior do sensor capacitivo que “mede” a anomalia numa área mais extensa, deste modo reduzindo o impacto do arranhamento.

## Condição 2 – Sensores de proximidade observando eixo de rotor polido -

O polimento por diamante, um método de amaciamento do eixo e endurecimento de sua superfície, é um procedimento padrão necessário sempre que sensores de proximidade de corrente parasita estão sendo usados. O polimento resulta em níveis reduzidos de runout elétrico captados pelos sensores de corrente parasita. Após o eixo ser polido por diamante, as medições com cada tipo de sensor de proximidade foram repetidas.

Pela Figura 4, pode ser visto que o runout elétrico do sensor de corrente parasita foi reduzido para 0,27 mils (6,9µm). Entretanto, o runout elétrico do sensor capacitivo (Figura 5) permanece aproximadamente em 0,13 mils (3,3µm). Comparando as Figuras 4 e 5 com as Figuras 2 e 3, o polimento por diamante dividiu o nível de runout elétrico do sensor de corrente parasita, porém não afetou essencialmente o sensor capacitivo. Disto pode-se inferir que o polimento por diamante não é necessário quando usando sensor de proximidade capacitivo. Isto foi corroborado por outros testes de campo conduzidos pelo fabricante do sensor capacitivo, mostrando um sinal de vibração mais claro para o sensor capacitivo do que para o sensor de corrente parasita mesmo no caso do sensor capacitivo observando uma superfície não polida, em comparação com o sensor de corrente parasita observando uma superfície polida.

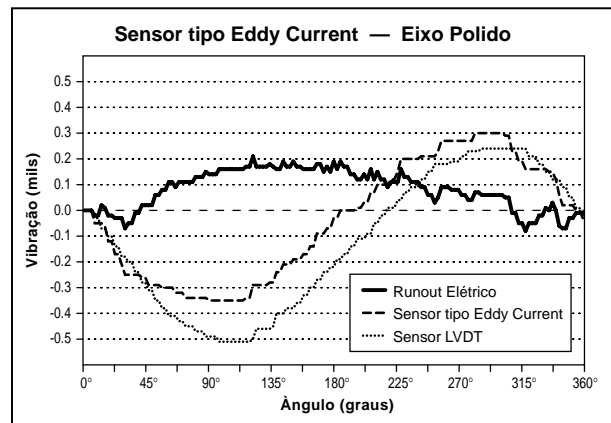


Figura 4 – Resultados do teste para sensor de proximidade de corrente parasita observando eixo de rotor polido.

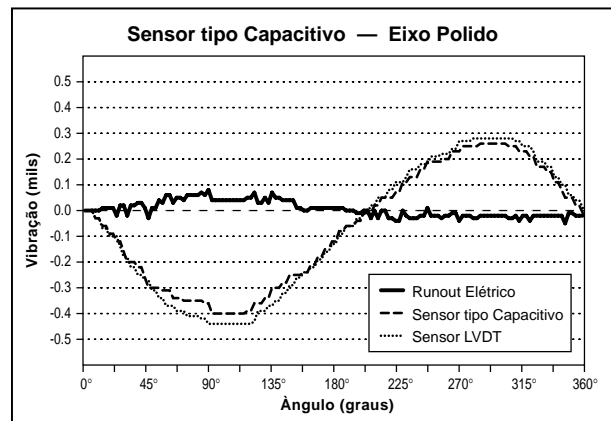


Figura 5 – Resultados do teste para sensor de proximidade capacitivo observando eixo de rotor polido.

## 8. CONCLUSÃO

Pareceria razoável inferir, pelos resultados do teste, que o sensor de proximidade capacitivo é imune ao runout. A discrepância entre suas leituras e àquelas do sensor LVDT é difícil de explicar com o equipamento limitado disponível para o teste. Entretanto, já que o nível de runout elétrico foi o mesmo (0,13 mils ou 3,3µm), tanto antes quanto depois do polimento por diamante, é razoável concluir que quando usando um sensor de proximidade capacitivo, o polimento do eixo não é necessário.

O teste do arranhamento mostra a *insensibilidade* do sensor de proximidade capacitivo para arranhamentos na superfície do eixo. Para ambos o fabricante de máquinas e o grupo de manutenção do mesmo, esta característica conduziria a uma economia de custo significativa pela eliminação da necessidade de desmontar a máquina para polir novamente o eixo do rotor sempre que uma ferramenta acidentalmente arranhasse a superfície do rotor no caminho do sensor de proximidade.

Já que o runout elétrico de 0,13 mil (3,3 $\mu$ m) do sensor de proximidade capacitivo está abaixo dos limites máximos especificados nos padrões industriais, para casos onde suspeitas leituras de vibrações falsas devido ao runout elétrico alto ou um eixo magnetizado de rotor for um problema, um sensor capacitivo pode ser instalado para determinar o movimento verdadeiro do eixo do rotor. Estes casos estão normalmente sendo investigados pelo fabricante do sensor e os resultados deverão ser apresentados em documento futuro.

Apesar dos testes de runout elétrico serem apenas um de muitos a serem efetuados usando o sensor de proximidade capacitivo, ele é um produto cujas características oferecem uma alternativa real para os usuários incomodados com runout elétricos, arranhamentos na superfície ou outros problemas associados com a tecnologia ordinária de sensores de corrente parasita. A eliminação de tais causas de falsos sinais conduz a um melhor conhecimento da situação que, em troca, pode resultar em reduzidas paradas de máquina. Finalmente, ambos tempo e dinheiro podem ser economizados pelas partes envolvidas.

## 9. REFERÊNCIAS

1. “Vibration, Axial Position, and Bearing Temperature Monitoring Systems”, Norma API 670, 3ª Edição, Novembro 1993; Instituto de Petróleo Americano, 1993.
2. Stephen J. Chapman, “Electric Machinery Fundamentals”, McGraw-Hill, 1985.
3. “Catálogo de Monitoramento de Condição”, SKF USA Inc., 1991.

## 10. RECONHECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a *Mark DeBlock, Michael Mladjenovic e Hugh Fife da GE Motors and Industrial Systems (Peterborough, Ontario, Canada)* pela sua generosa assistência na preparação deste documento. Sem o seu auxílio, este documento não teria sido possível.

## 11. DETALHES BIOGRÁFICOS DOS AUTORES

*Jackson Lin* graduou-se em Engenharia Mecânica pela Queen’s University (Kingston, Canada) em 1991. Completou seu MBA na McGill University (Montréal, Canada) em 1996. Também estudou por um período no Institut Supérieur de Affaires (Jouy-en-Josas, França) em 1995. Atualmente, Mr. Lin é Gerente de Produtos para Aplicações Industriais da VibroSystM.

*Marc R. Bissonnette* é Engenheiro Eletricista graduado pela University of Sherbrooke. Desde 1987 está envolvido com o desenvolvimento e marketing em sistemas de monitoramento de grandes máquinas rotativas. Mr. Bissonnette atualmente é Gerente de Vendas da Divisão de Monitoramento das Condição da Máquina da VibroSystM.