

DIAGNÓSTICO DE CAVITAÇÃO NOS INTERNOS DE VÁLVULAS DE CONTROLE

ALEXANDRE A. PAES¹, CELSO J. MUNARO², PATRICK MARQUES CIARELLI³

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Av. Fernando Ferrari, 514 - Campus Universitário
Vitória, ES - Brasil
CEP 29075-910*

E-mails: ¹eng.alexandre.paes@gmail.com, ²cjmunaro@gmail.com, ³pmc01@uol.com.br

Abstract— Cavitation is a physical phenomenon that causes serious damage to control valve's internals. Its monitoring and diagnosis are critical to prevent premature degradation of the equipment where it occurs. This work evaluates the implementation of Shewhart charts and vector support machine methods on pressure and acoustic emission signals to detect incipient cavitation in a pneumatic control valve operating in a water flow control loop. The standard deviation and coefficient of variation of acoustic emission signal are used because they are more sensitive to the presence of cavitation. The results of the two methods are compared using four performance metrics. The results provide important information for choosing the cavitation detection method depending on the complexity, data availability and presence of false diagnosis.

Keywords— cavitation, fault diagnosis, support vector machine, Shewhart charts, acoustic measurements.

Resumo— A cavitação é um fenômeno físico que traz sérios danos aos internos de válvulas de controle. Seu monitoramento e diagnóstico são de suma importância para evitar a degradação precoce dos equipamentos onde se manifesta. Neste trabalho avaliou-se a aplicação das cartas de Shewhart e de máquinas de vetores suporte a sinais de pressão e de emissão acústica para detectar a cavitação incipiente em uma válvula pneumática de controle atuando em uma malha de controle de vazão de água. O desvio padrão e o fator forma do sinal de emissão acústica são utilizados por serem mais sensíveis à presença de cavitação. Os resultados dos dois métodos foram comparados usando quatro métricas de desempenho. Os resultados fornecem importantes subsídios para escolha do método de detecção da cavitação em função da complexidade, disponibilidade de dados e presença de erros de diagnóstico.

Palavras-chave— Cavitação, diagnóstico de falhas, máquina de vetores suporte, cartas de Shewhart, medições acústicas.

1 Introdução

Um dos mais importantes elementos finais em malhas de controle são as válvulas de controle, pois desempenham a restrição à passagem do fluido tornando possível a modulação das grandezas de interesse ao processo.

Porém, em certas regiões de operação, a restrição necessária à passagem do fluido pode produzir turbulência e regiões de baixa pressão, que em condições termodinâmicas convenientes, produzem a vaporização, e, por conseguinte, a condensação súbita do líquido à jusante da válvula. Isto causa a erosão de seus internos e das tubulações imediatamente após, trazendo degradação precoce (Hubballi et al., 2013; Bo et al., 2005). Este fenômeno é conhecido como cavitação, e sua predição é importante para evitar tais consequências.

Na manutenção preditiva tradicional o monitoramento sobre as válvulas de controle se faz através do uso de sensores, e ou instrumentação específica instalada próxima a este elemento final. A partir dos dados coletados, um especialista pode detectar um problema (Fisher Control International, 2005). Entretanto, esta detecção muitas vezes ocorre de forma tardia, quando a erosão produziu desgaste elevado. Desta forma, a utilização de algoritmos que visem antecipar a detecção do fenômeno é altamente desejável. A avaliação de momentos estatísticos de sinais

acústicos é uma abordagem usual para realizar esta detecção (Shukri et al., 2011).

Neste trabalho, um procedimento semelhante ao feito em (Ulanickia et al., 2015) foi utilizado para a coleta de dados. Foi avaliado o potencial dos sinais de pressão à jusante e de emissão acústica para detecção da cavitação através dos algoritmos baseados em *Support Vector Machine* (SVM) e cartas de Shewhart (CS). Os resultados obtidos indicam que o desvio padrão e o fator forma do sinal de emissão acústica são sensíveis à presença de cavitação, e ambos os algoritmos alcançaram relevantes taxas de detecção, com uma ligeira superioridade do SVM.

2 Descrição dos ensaios

Os ensaios foram efetuados em uma planta piloto, sendo coletados os sinais de saída de dois transdutores de pressão, instalados à montante e à jusante da válvula, e, o sinal de um microfone de eletreto, este fixado imediatamente após a saída da válvula, no corpo da tubulação. A válvula usada é do tipo globo rotacional, modelo 35-35212, diâmetro interno de 1"1/2, ANSI 150, com Cv de projeto 8,4, contendo um obturador excêntrico e operando com água.

Antes de iniciar o ensaio, ajustou-se a temperatura da água para 38° C, e com uma bomba de múltiplos estágios tipo *Booster*, se fez recircular água

através da válvula. O controlador Freelancer 2000 Select da ABB, instalado na planta, foi usado para enviar sinais de 4 a 20 mA, para que a válvula operasse em 70, 50, 30, 20 e 10% de abertura. Para validação dos resultados foram coletados novos dados, fixando a frequência da bomba em 60 Hz, e, variando a abertura da válvula em 40, 35, 30, 27, 24, 21, 18 e 13%. No ensaio final, foi fixada a abertura da válvula em 10% e se fez variar a frequência entregue a bomba pelo inversor em 37, 49, 52, 57, 64, 70, 75 e 85% dos 60 Hz.

Para cada teste, foram coletados os sinais de 4-20 mA dos transdutores de pressão que foram convertidos em sinais de tensão. O microfone foi polarizado, e seu sinal foi amplificado em 34 dB antes de ser transmitido ao processo de coleta de dados. Os sinais foram adquiridos com o sistema de aquisição de dados da empresa Dspace, com frequência de amostragem em 25 kHz.

3 Cálculo do índice sigma para mensurar o nível de cavitação nos pontos de operação considerados

O índice sigma, σ_c , adotado pela *International Society of Automation (ISA)* em RP75.23.01, é uma prática recomendada para indústria para estimar o nível de cavitação em válvulas de controle. No seu desenvolvimento, calcula-se o valor de σ_c referente às condições de serviço, e, com esta informação, se faz a comparação deste valor com um valor de referência relacionado com a região de cavitação em análise: esta informação é fornecida pelos fabricantes. Quanto menor o valor do σ_c mais provável será a ocorrência de cavitação severa. Este índice é dado por

$$\sigma_c = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2}, \quad (1)$$

onde P_1 é a média da pressão de serviço a montante, P_2 é a média da pressão de serviço a jusante da válvula e P_v é a pressão de vaporização na temperatura a montante.

Na norma ISA - RP75.23.01 é afirmado que a válvula de controle não sofre cavitação se $\sigma_c > 15$ para válvulas de perda de pressão baixa, ou $\sigma_c > 8$ para válvulas de perda de pressão alta. Em sistemas onde o fluido do processo é a água, têm-se, também, como recomendações dos fabricantes, para válvulas com guarnição padrão, $\sigma_c = 2,5$ (*manufacture's recommended cavitation limit*) e $\sigma_c = 2,3$ (*incipient danger*). Estes serão os valores usados neste trabalho para determinar as regiões de detecção da cavitação.

Na Figura 1 são mostrados P_1 , σ_c e o desvio padrão σ do sinal de emissão acústica medido, considerando $P_2 = 1,09$ bar e $P_v(38^\circ\text{C}) = 0,0662$ bar. Usando a Equação 1, a cavitação incipiente se inicia um pouco abaixo do ponto de operação da válvula em 30% de abertura, que coincide com o aumento do desvio padrão σ do sinal.

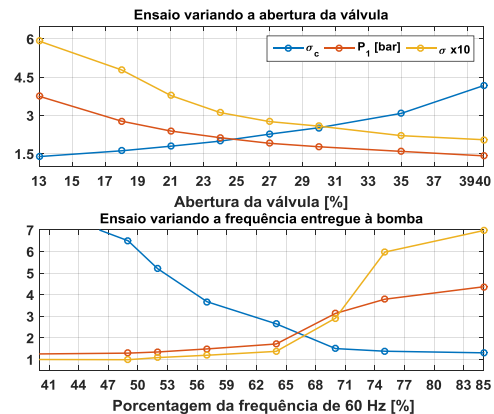


Figura 1- Resultado dos dois ensaios, variando a abertura da válvula e variando a frequência entregue a bomba.

Nota-se na Figura 1 que, variando a frequência fornecida à bomba, a pressão à montante aumenta gradativamente até 64% da frequência da rede. Quando a frequência é ajustada para 70% há um salto em P_1 causando uma redução abrupta de σ_c de 2,65 para 1,51. Percebe-se nesta região que pequenas variações nas frequências entregue à bomba produzem grandes alterações em σ_c , quando comparadas a outros pontos de operação, e que nesta região se situa a transição de normalidade para a região de cavitação.

Quando a cavitação começa a ocorrer, a vazão do fluxo pela válvula vai sendo restringida e o fluxo à jusante entra em rotação, o que, promove uma região de baixa pressão, propiciando a vaporização do fluido. Portanto, há perturbação na variação de pressão à montante em função da restrição de vazão ocorrida por este mecanismo, explicando este salto de pressão nesta região.

4 Análise dos dados coletados

Os métodos para detecção de cavitação propostos se baseiam nos momentos estatísticos dos dados. Portanto, o primeiro passo é avaliar o comportamento da média (μ), desvio padrão (σ), kurtose (κ) e o fator forma (s) para pontos de operação com e sem cavitação (ver (Bo et al., 2005) para detalhes sobre os cálculos).

Foram coletadas 700.000 amostras de cada sinal com frequência de amostragem de 25 kHz. Destes, 20 janelas com 7000 dados cada foram selecionadas para o cálculo dos momentos, ou seja, o tamanho de cada janela é 1% do tamanho da população.

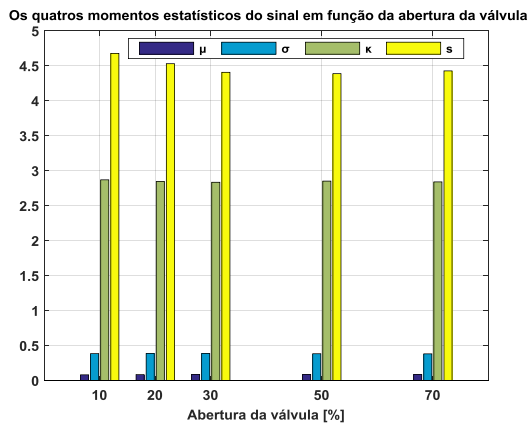


Figura 2 - Variação dos momentos estatísticos do sinal de pressão a jusante nas regiões de cavitação e não cavitação.

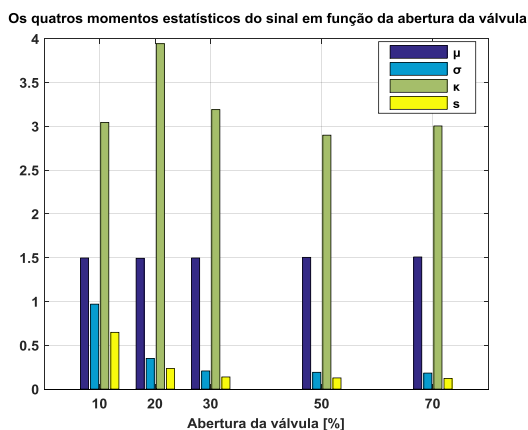


Figura 3 - Variação dos momentos estatísticos do sinal de emissão acústica nas regiões de cavitação e não cavitação.

As variações dos momentos estatísticos são mostradas nas Figuras 2 e 3 para a pressão à jusante e para os sinais acústicos, respectivamente. Comparando estas figuras observa-se que o desvio padrão e o fator forma são mais sensíveis às situações com (abertura < 30%) e sem (abertura ≥ 30%) cavitação quando se usa sinais acústicos. Portanto, estes momentos do sinal serão utilizados neste trabalho. Observa-se ainda que a média é pouco afetada, mesmo para sinais acústicos. Para a kurtose há variação apenas no início da cavitação.

5 Técnicas utilizadas

5.1 Uso de cartas de Shewhart (CS)

O monitoramento estatístico univariado é a forma mais simples de detectar desvios nos sinais associados a cavitação. Neste trabalho são utilizadas duas cartas de Shewhart (Montgomery e Runger, 2002): uma sobre o sinal e outra sobre o desvio padrão do sinal (carta de Shewhart tipo S). Os limiares foram determinados pelo desvio padrão do sinal (no caso da carta de Shewhart tipo S), pois este mostrou ser sensível a cavitação (Figura 3), e pelo próprio sinal acústico (carta de Shewhart).

5.2 Support Vector Machine (SVM)

SVM é uma técnica de reconhecimento de padrões baseada na metodologia de aprendizagem por exemplos. De forma sucinta, tem-se uma máquina cuja tarefa é aprender a mapear $x \mapsto f(x, \alpha)$, onde a função kernel $f(x, \alpha)$ é usada para classificar um dado x de acordo com o ajuste do parâmetro α (Burges, 1998). Na fase de treinamento é selecionada qual a função $f(x, \alpha)$ que efetivamente será usada como classificadora. Através de uma matriz $\mathbf{X}$ e um vetor y , que contém as classes verdadeiras de cada vetor da matriz $\mathbf{X}$ (dados de entrada para treinamento), são calculados os parâmetros da função selecionada.

Em função do espaço característico, construído através do conjunto de vetores em R^n , da divisão de classes e da escolha de $f(x, \alpha)$, o algoritmo de treinamento irá produzir uma superfície de separação (hiperplano) que irá mapear cada vetor da matriz $\mathbf{X}$ em cada classe, de forma a minimizar o erro de classificação. No caso em que o vetor tenha duas dimensões e $f(x, \alpha)$ seja uma função linear, tem-se uma reta como hiperplano separador.

Nos experimentos foram avaliadas duas funções: uma linear e uma de base radial (RBF) Gaussiana. Em Burges (1998, pp. 128-136 e 142) descreve-se com detalhes ambas as funções separadoras usadas. Na função RBF Gaussiana, o parâmetro α é o desvio padrão σ_k da Gaussiana que deve ser fornecido como parâmetro de entrada.

6 Análise comparativa dos métodos

6.1 Análise prévia usando cartas de Shewhart e SVM

Para aplicar as cartas de Shewhart e o SVM, foram extraídas as informações dos sinais acústicos. Para cada um dos 5 pontos de operação mencionados na Seção 2, foram selecionadas 20 janelas com 7000 amostras cada, totalizando 700.000 amostras. Esses dados foram usados para modelar as cartas de Shewhart e as funções do SVM. As amostras com abertura da válvula de 10% a 20% foram rotuladas com cavitação, enquanto que as de abertura de 30% a 70% sem cavitação.

Para a carta de Shewhart é necessário somente o sinal propriamente dito de cada janela e calcular os limites de controle estatístico. Para usar a carta de Shewhart tipo S é necessário obter o desvio padrão de cada segmento dos sinais. Para isso, cada uma das janelas de 7000 amostras foi dividida em 70 partes com 100 amostras cada e de cada parte foi calculado o desvio padrão. Foi feito o teste de hipótese de Kolmogorov-Smirnov para avaliar se os valores calculados tinham uma distribuição normal, pois para o uso das cartas de controle este é o critério que deve ser atendido.

Por fim, para o SVM, para cada janela foram calculados os valores de desvio padrão e fator forma,

por serem estes os momentos estatísticos mais sensíveis à cavitação, como indicado na Seção 4.

Para validação foi coletada as mesmas quantidades de amostras usadas para modelagem, igualmente distribuídas para as aberturas de 35, 30, 27, 24 e 21%, as quais foram divididas em 20 janelas de 7000 amostras para cada abertura e realizados os mesmos procedimentos anteriores para a extração dos momentos. Foi considerada cavitação para aberturas abaixo de 30%. Na Figura 1 no gráfico superior, são apresentados os valores dos σ_c calculados para os respectivos pontos de operação.

Também se fez o ensaio com a abertura da válvula fixa em 10% e variou-se a frequência entregue à bomba. Este experimento visou verificar se a cavitação era igualmente identificada variando a frequência da bomba ao invés da abertura da válvula. Neste ensaio foram considerados os dados coletados em 57, 64, 70, 75 e 85% de 60 Hz para nova validação. A quantidade de amostras e os procedimentos de janelamento foram os mesmos do primeiro ensaio.

Foram avaliados intervalos de confiança (ou limites de controle) de 1 a 4 desvios padrão para a carta de Shewhart. Na Figura 4 é apresentado o resultado gráfico para uma das cartas de Shewhart sobre o sinal. As primeiras 7000 amostras são os dados de treinamento (sem cavitação) e acima são os dados de teste, com a válvula operando em 24% de abertura, e considerando um limiar de 4 desvios padrão calculados na fase de treinamento, delimitados por UCL (*Upper Control Limit*) e LCL (*Lower Control Limit*), e a média do sinal CL (*Center Line*). As operações da válvula com pontos verdes foram identificados como sem cavitação e com vermelhos como cavitação.

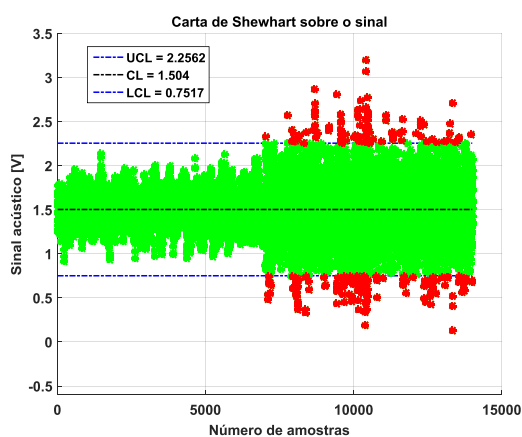


Figura 4 - Carta de Shewhart sobre o sinal.

Dois SVMs foram treinados com os dados de desvio padrão e fator forma: um linear e um com kernel RBF Gaussiano. Na Figura 5 são mostrados, para os dados de validação, os momentos utilizados nos SVMs: no eixo das ordenadas está o desvio padrão e no das abscissas o fator forma. Como pode ser observado, é possível obter uma boa separação dos dados com e sem cavitação com apenas uma reta.

Antes de iniciar os experimentos com o SVM, houve uma etapa de calibração, pois a função RBF

Gaussiana tem σ_k como parâmetro. Foi realizada uma busca otimizada deste de 0 a 15, em intervalos de 0,1 a fim de que a sua escolha maximizasse a acurácia, que é definida como o número de detecções corretas (seja de cavitação ou não) dividido pelo número total de detecções realizadas. A função de kernel linear não precisa deste tipo de calibração por não haver parâmetro a ser ajustado.

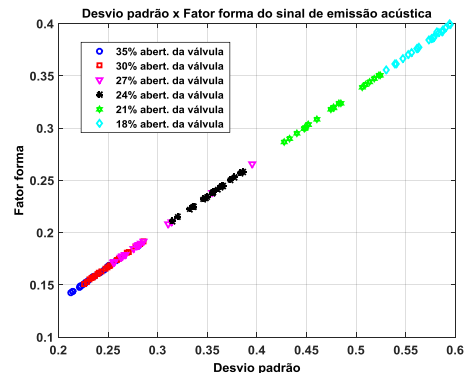


Figura 5 - Espaço característico do desvio padrão versus fator forma. Aberturas com 35 e 30% não possuem cavitação, e menores que 27% há presença de cavitação.

Os resultados gráficos das classificações são apresentados na Figura 6, onde, no espaço característico são apresentadas as regiões delimitadas pelas funções classificadoras.

Na RBF Gaussiana, vetores na região externa ao perímetro delimitado foram classificados como havendo cavitação e na função linear isto corresponde aos pontos acima da reta. Visualmente, houve um pequeno erro em ambas as abordagens, devido a uma superposição das regiões no espaço característico entre a operação da válvula em 30% de abertura (região sem cavitação) e em 27% de abertura (região de cavitação) que se encontra na fase incipiente do fenômeno.

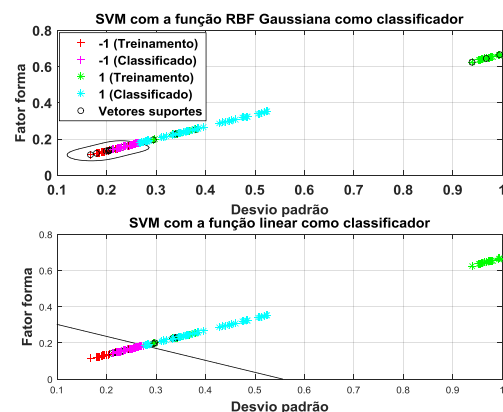


Figura 6 - SVM usando as funções classificadoras RBF Gaussiana e linear; ensaio variando abertura da válvula e fixa a frequência da bomba em 60 Hz.

No ensaio variando a frequência entregue à bomba (Figura 7), os SVMs com ambas as funções classificadoras conseguiram classificar de forma correta todos os pontos, pois neste teste não houve superposição das regiões de transição de classes.

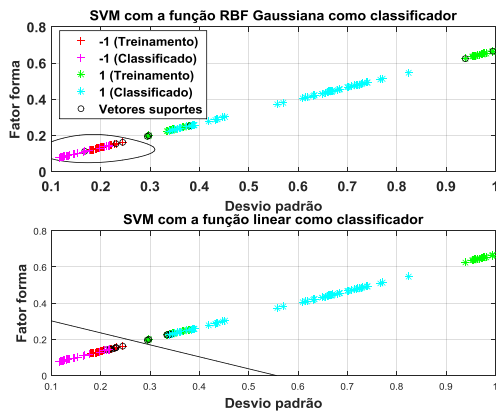


Figura 7 - SVM usando as funções classificadoras RBF Gaussiana e linear; ensaio variando a frequência entregue a bomba e abertura da válvula fixada em 10%.

6.2 Medidas de desempenho usadas para comparação entre os algoritmos considerados

A partir dos resultados obtidos na Seção 6.1, foram utilizadas quatro métricas para quantificar e comparar os dois métodos. As métricas são: precisão (P), sensibilidade (S), medida F1 (F1) e acurácia (A) (Faceli et al., 2011):

$$P = VP / (VP + FP), \quad (2)$$

$$S = VP / (VP + FN), \quad (3)$$

$$F1 = 2PS / (P + S), \quad (4)$$

$$A = \frac{VP + VN + FP + FN}{VP + VN + FP + FN}, \quad (5)$$

onde as definições são apresentadas no Quadro 1.

Note que a precisão penaliza a detecção correta do fenômeno em detrimento a uma detecção falsa. A sensibilidade penaliza a detecção correta da cavitação em detrimento a não detecção da ocorrência de cavitação. Portanto, P baixo implica que houve alta taxa de ocorrência de FP, ao passo que S baixo implica que houve alta taxa de ocorrência de FN.

Quadro 1 - Parâmetros considerados para as métricas

Nomenclatura	Descrição	Definição
VP	Verdadeiro Positivo	Ocorreu a cavitação e foi detectada.
VN	Verdadeiro Negativo	Não ocorreu a cavitação e não foi detectada.
FP	Falso Positivo	Não ocorreu a cavitação, mas foi detectada.
FN	Falso Negativo	Ocorreu a cavitação, mas não foi detectada.

Por sua vez, a medida F1 é uma média harmônica entre precisão e sensibilidade, e a acurácia penaliza todos os diagnósticos corretos em detrimento a todos os tipos de erros.

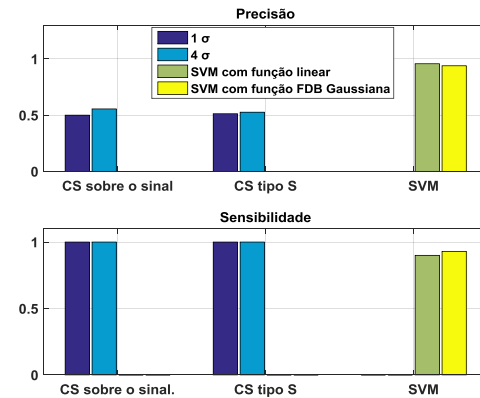


Figura 8 - Precisão e sensibilidade para CS e SVM para o ensaio onde a abertura da válvula variou e a velocidade da bomba foi fixada em 3500 rpm (60 Hz).

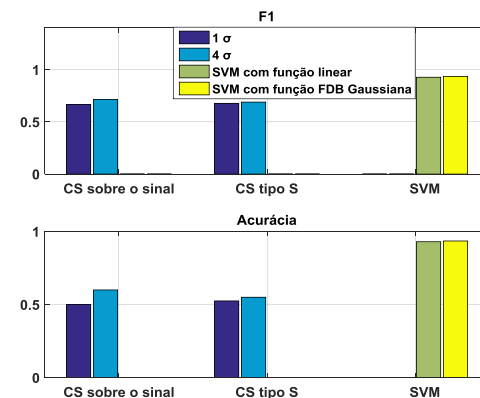


Figura 9 - Medida F1 e acurácia para CS e SVM para o ensaio onde a abertura da válvula variou e a velocidade da bomba foi fixada em 60 Hz.

Na Figura 8 são exibidos os resultados para as métricas precisão e sensibilidade, onde é considerada a variação da abertura da válvula, e a frequência entregue à bomba é fixa. Em relação às cartas de Shewhart (CSs), a melhor precisão foi alcançada pelas CS sobre sinal de emissão acústica, sendo que com o aumento dos limites de controle estatístico houve uma pequena melhora nesta métrica. Isto não aconteceu para CS tipo S. Note que, a CS sobre o sinal teve singelo destaque em relação CS tipo S devido ao fato que houve pequena diminuição de FP com o aumento dos limites de controle.

O SVM, com ambas as funções classificadoras, alcançou melhores resultados que a CS sobre o sinal, pois apresentou menores valores de FP. Por outro lado, na métrica sensibilidade, as CSs tiveram melhores resultados, pois tiveram FN nulo, ou seja, identificaram todas as vezes que acontecia cavitação. Nota-se que nas métricas F1 e acurácia (Figura 9), o SVM também alcançou melhores resultados. Portanto, mesmo tendo superposição nos espaços característicos, o SVM se destacou neste ensaio sobre as CSs, no diagnóstico da cavitação através do sinal de emissão acústica.

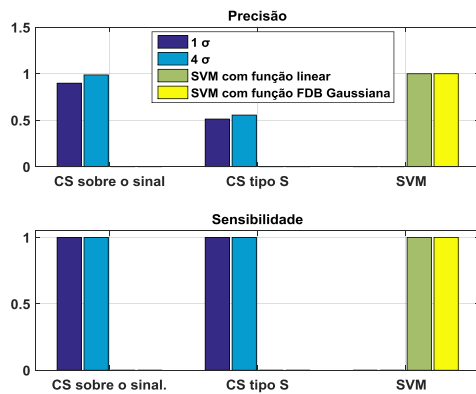


Figura 10 - Precisão e sensibilidade para CS e SVM para o ensaio onde a frequência entregue à bomba foi variada e a abertura da válvula fixada em 10%.

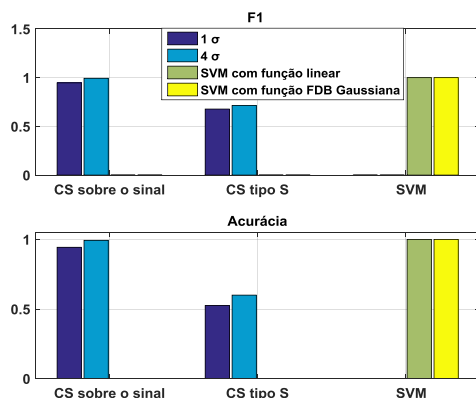


Figura 11 - Medida F1 e acurácia para CS e SVM para o ensaio onde a frequência entregue à bomba foi variada e a abertura da válvula fixada em 10%.

Analisando as Figuras 10 e 11, que consideram o ensaio que se faz variar a frequência entregue à bomba, percebe-se que os resultados da CS sobre o sinal, usando limite de controle de quatro desvios padrão, se aproximaram aos resultados do SVM em todas as métricas. Ambos conseguiram ausência de FN, e para FP o primeiro apresentou 1,25% e o segundo o suprimiu. Neste sentido, pode-se afirmar que o monitoramento pela CS sobre o sinal de emissão acústica, por ser de fácil execução, é indicado ao monitoramento da cavitação quando se torna perceptível o fenômeno, provocando variação mais acentuada no desvio padrão, ou seja, na região onde o σ_c calculado fica abaixo de 2 (veja Figura 1, gráfico inferior, e Figura 7).

7 Conclusão

Neste trabalho foram avaliados a aplicação das cartas de Shewhart e SVM para detectar a cavitação em válvulas de controle usando sinais de pressão e de emissão acústica. A análise dos momentos estatísticos destes sinais evidenciou a boa sensibilidade do desvio padrão e fator forma do sinal acústico à presença de cavitação.

Quatro métricas de desempenho foram utilizadas para comparar o desempenho da carta de Shewhart (sobre o sinal e sobre o desvio padrão) com o algo-

ritmo do SVM (sobre o desvio padrão e o fator forma). Para a cavitação originada variando a abertura da válvula, o SVM foi superior na precisão, F1 e acurácia. A diferença na carta de Shewhart para o sinal e para o desvio padrão foi muito pequena. Ao se variar a frequência da bomba para se produzir cavitação, a carta de Shewhart sobre o sinal teve desempenho bastante similar ao SVM para todas as métricas. A carta de Shewhart sobre o desvio padrão teve desempenho ligeiramente inferior em três das métricas.

Conclui-se que as cartas de Shewhart são mais dependentes dos dados usados para o treinamento, uma vez que os resultados do método SVM foram similares nos dois casos.

A carta de Shewhart sobre o sinal resulta em uma alternativa mais simples para o monitoramento, com resultados não muito inferiores ao SVM, desde que os sinais de treinamento sejam selecionados com rigor. Destaca-se ainda que o SVM requer dados com e sem cavitação para o treinamento, sendo que dados de cavitação nem sempre estão disponíveis, pois é justamente o que se quer detectar.

Referências Bibliográficas

- Bo-suk, Y., et al., 2005, Cavitation detection of Butterfly valve using support vector machines, Journal of Sound and Vibration, Vol. 287, pp. 25-43.
- Burges, C. J. C., 1998, A tutorial on support vector machines for pattern recognition, Data Mining and Knowledge, no. 2, pp. 121-167.
- Faceli, K., et al., 2011, Inteligência artificial: Uma abordagem de Aprendizado de Máquina, Rio de Janeiro: LTC., pp. 163-165.
- Fisher Control International, 2005, Control valve handbook, Fourth edition, pp. 169-172.
- Hubballi, B. V., et al., 2013, A Review on the prediction of cavitation erosion inception in hydraulic control valves, international journal of emerging technology and advanced engineering, Vol. 3, Issue 1.
- Montgomery, C. D. and Runger, C. G., 2002, Applied statistics and probability for engineer, Third Edition, John Wiley & Sons, inc., pp. 595-612.
- Shukri, I.N.B.M, Mun, G.Y.and Ibrahim, R.B, 2011, A study on control valve fault incipient detection monitoring system using acoustic emission technique, ICCRD, Shangai, China.
- Ulanickia, B., Picinali, L., Janus, T., 2015, Measurements and analysis of cavitation in a pressure reducing valve during operation – a case study, CCWI, Procedia Engineering, no. 119, pp. 270-279.