

Aplicação de aprendizado não supervisionado para identificação não destrutiva do amaciamento em compressores^{*}

Gabriel Thaler^{*} Nicolas A. Nunes^{*}
Ahryman S. B. de S. Nascimento^{*} Antonio L. S. Pacheco^{**}
Rodolfo C. C. Flesch^{*}

^{*} Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mails: thaler.gabriel@posgrad.ufsc.br, nicolas.antero@grad.ufsc.br, a.nascimento@labmetro.ufsc.br, rodolfo.flesch@ufsc.br).

^{**} Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, (e-mail: pacheco@inep.ufsc.br).

Abstract: This work presents an unsupervised learning method for running-in detection in reciprocating hermetic compressors for refrigeration. Running-in detection is an important piece of information for performance tests in such devices. An automatic test rig was developed to measure features that are possibly related to the running-in process in compressors and can be obtained in non-destructive tests. Data obtained in running-in tests were clustered using the k-means algorithms and the clustering results were then analyzed to search for patterns that could indicate the end of the running-in phenomenon. Three detection methods were developed based on the clustered data, and one of them performed better than the others. The best alternative for identifying the end of the running-in process was obtained using the kurtosis of the current of the electric motor of the compressor as input data.

Resumo: Este trabalho apresenta um método de aprendizado não supervisionado para detecção do estado de amaciamento em compressores herméticos alternativos para refrigeração, informação importante para caracterização energética desse tipo de compressor. Para avaliar possíveis indicativos desse processo, foi desenvolvida uma bancada automática de ensaios capaz de medir de forma não destrutiva grandezas relacionadas à operação do dispositivo e possivelmente conectadas ao fenômeno do amaciamento. O algoritmo k-médias foi usado para agrupar dados de ensaios com compressores novos e já operados, buscando grandezas cuja divisão se adequasse à esperada devido ao amaciamento. Foram desenvolvidos três métodos de classificação baseados na distribuição de grupos ao longo dos ensaios. As avaliações realizadas mostraram um dos métodos propostos como o mais condizente com os dados experimentais, e sua aplicação na curtose da corrente elétrica do motor resultou em dados majoritariamente concordantes quanto ao final do processo de amaciamento.

Keywords: unsupervised machine learning; running-in; non-destructive analysis; hermetic reciprocating compressors.

Palavras-chaves: aprendizado de máquina não supervisionado; amaciamento; análise não destrutiva; compressores herméticos alternativos.

1. INTRODUÇÃO

O início do contato deslizante entre duas superfícies de um mecanismo é marcado por um período transitório em diversos aspectos, com variações na taxa de desgaste, na temperatura dos materiais, no coeficiente de atrito, entre outros. Esse fenômeno, denominado amaciamento, acontece apenas uma vez na vida útil de um dado sistema, e é sucedido por um regime permanente tribológico, sendo um

^{*} Este trabalho foi apoiado pela Nidec Global Appliance, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto 432116/2018-4, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

fator importante na definição das propriedades mecânicas do contato (Blau, 2005).

Khonsari et al. (2021) apresentam uma revisão dos estudos teóricos e práticos sobre o amaciamento, os quais analisam o contato entre superfícies isolado da influência de outros mecanismos. Dos estudos realizados, tem-se que as mudanças na topografia e no coeficiente de atrito são os sinais mais claros do processo, e trabalhos já foram realizados analisando esse comportamento em modelos experimentais com materiais específicos (Blau, 2009; Zambrano et al., 2020).

A forma como o sistema é amaciado pode ter repercussões significativas na vida útil do produto. Na indústria auto-

mobilística, por exemplo, considera-se que o amaciamento adequado das lonas de freio seja necessário para garantir torque suficiente na frenagem (Blau, 2005), e estudos em motores de combustão interna também relacionam o fenômeno à qualidade do produto final (Blau, 2009).

Os métodos usuais de estudo do amaciamento envolvem análise de fatores como a topografia das superfícies, a taxa e forma de desgaste e o coeficiente de atrito do contato (Dowson et al., 1982; Blau, 2005; Khonsari et al., 2021). Apesar de algumas abordagens proporem tais fatores para detecção (Ruggiero et al., 2020), essas análises são normalmente utilizadas em trabalhos que avaliam o amaciamento em casos específicos de contato, como o contato entre superfícies de diferentes composições ou em diferentes formatos (Khonsari et al., 2021). Já em mecanismos com múltiplas peças móveis e diversos pontos de contato, tal análise é muito difícil, visto que fatores da operação conjunta, como o desalinhamento de peças e os acoplamentos entre subsistemas, complicam bastante a análise em relação ao caso de apenas uma peça móvel (Blau, 1991).

No setor de compressores herméticos alternativos para refrigeração, admite-se que o amaciamento ocorra nas primeiras horas de operação, em elementos cuja vida útil típica é de décadas. Portanto, para mitigar a influência do fenômeno na avaliação de parâmetros de desempenho, como a potência elétrica ativa consumida e a capacidade de refrigeração, os ensaios devem ser realizados apenas após a etapa de amaciamento, quando o compressor já se encontra tribologicamente em regime permanente (Schmitz, 2014). Como o compressor é composto por diversas peças móveis e é hermético, seria necessário o rompimento do selo e desmonte do dispositivo para análise direta da superfície e do atrito, de forma que sua remontagem implicaria um novo período de amaciamento. Com tais limitações e com a escassez de métodos indiretos para detecção de amaciamento, o processo atual de preparação dos compressores para ensaios de desempenho consiste em operá-lo em uma dada condição por um tempo predefinido. Esse tempo, para alguns casos, não garante o efetivo fim do amaciamento, e em outros poderia ser possivelmente reduzido com o sensoriamento e a automação adequados, economizando assim recursos do fabricante.

Para estudo do fenômeno de amaciamento em compressores herméticos, foi desenvolvida neste trabalho uma bancada de ensaios automatizada que permite controle das condições de operação do compressor sob ensaio. Tal bancada também é capaz de medir diversas grandezas possivelmente relacionadas ao amaciamento, como a vibração no corpo do dispositivo, a corrente elétrica do motor e a vazão mássica gerada pela operação.

O volume de dados gerados em ensaios com compressores durante e após o amaciamento possibilitou o uso de ferramentas para: identificação a posteriori do amaciamento nos ensaios, avaliação da relação entre o fenômeno e cada grandeza medida. Para tal aplicação, este trabalho propõe a utilização do algoritmo k-médias de agrupamento, dada a versatilidade do método e suas aplicações em trabalhos de sensoriamento e classificação de modos operacionais em maquinário (Ahmed et al., 2020; Uhlmann et al., 2018). O agrupamento é uma atividade de classificação não supervisionada, ou seja, não são definidos critérios de separação

a priori, apenas alguns parâmetros de configuração do algoritmo. Para o algoritmo empregado neste trabalho, é necessário informar o número de conjuntos desejados, a função custo para minimização e o método de inicialização.

A partir dos agrupamentos gerados pelo algoritmo, propõe-se a criação de critérios de avaliação com base nos conceitos estabelecidos sobre o amaciamento e nos dados experimentais obtidos em ensaios de amaciamento. Assim, podem ser também definidos qual o conjunto de grandezas e quais técnicas de processamento de dados permitem a classificação do compressor como amaciado ou não em um dado instante. Tal classificação poderá, então, ser utilizada para determinar o momento a partir do qual um compressor encontra-se em regime permanente tribológico, podendo ser submetido aos ensaios de desempenho.

O restante do trabalho é organizado como segue. A Seção 2 descreve o problema do amaciamento no contexto dos compressores herméticos alternativos para refrigeração, detalha a necessidade por melhores métodos de detecção do fenômeno e apresenta uma revisão da literatura sobre os métodos existentes para detecção indireta do amaciamento. A Seção 3 descreve o planejamento e a implementação da bancada automática de avaliação do amaciamento e os procedimentos de ensaio utilizados neste trabalho. A Seção 4 apresenta a forma como foram processados os dados de ensaios e os métodos propostos para classificação do amaciamento com base no agrupamento de dados de ensaios utilizando o algoritmo k-médias. A Seção 5 avalia os resultados obtidos com a aplicação dos métodos desenvolvidos em dados experimentais. Por fim, a Seção 6 apresenta a conclusão do trabalho.

2. IDENTIFICAÇÃO INDIRETA DO AMACIAMENTO

Esta seção discorre sobre o problema da detecção do amaciamento em compressores herméticos alternativos e sobre trabalhos que propõem grandezas que possam ser utilizadas em métodos automáticos de detecção.

2.1 Caracterização do problema

O procedimento atual de amaciamento utilizado na indústria de compressores consiste em operar o dispositivo em condições específicas por um número de horas determinado experimentalmente (Martins et al., 2011). Barros (2019) apresenta dados da capacidade de elevação de pressão de compressores, um parâmetro de desempenho alternativo para compressores obtido tipicamente nos instantes iniciais de funcionamento do compressor, em situações anteriores e posteriores ao amaciamento, evidenciando a diferença de desempenho dos dispositivos devido ao fenômeno.

Comportamentos semelhantes também foram observados em ensaios de desempenho energético mais usuais, realizados em calorímetro. Na Figura 1 são mostrados a média e o desvio-padrão de parâmetros de desempenho energético em 3 ensaios consecutivos com 33 compressores de um mesmo modelo, escalonados para o intervalo [0,1]. As primeiras medições equivalem aos resultados típicos dos ensaios, e os ciclos seguintes de medição foram realizados de forma a evidenciar os possíveis efeitos do amaciamento nos parâmetros de interesse durante a realização dos ensaios. Mesmo que o primeiro ensaio tenha sido realizado

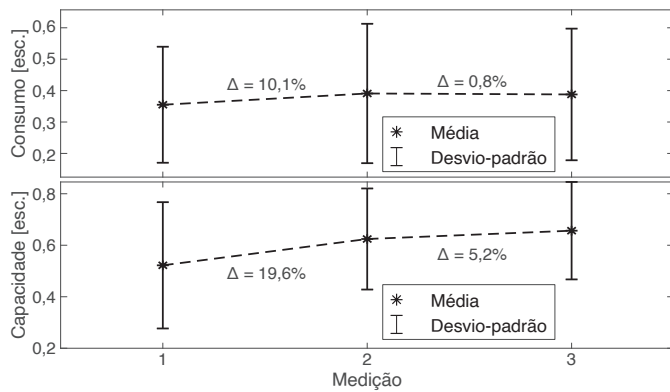


Figura 1. Média e desvio-padrão de parâmetros de desempenho escalonados em ensaios de calorímetro consecutivos.

apenas após preparação da unidade utilizando o método padrão de amaciamento, é possível observar que ainda existe uma diferença significativa entre as primeiras e as segundas medições realizadas, consideravelmente maior do que a observada entre as segundas e as terceiras medições. Isso ocorre porque, para o modelo de compressor analisado, o tempo tipicamente adotado no procedimento de amaciamento não é suficiente e o compressor continua amaciando durante os ensaios, que podem durar até 4,5 h (Coral et al., 2019).

2.2 Possíveis grandezas relacionadas ao amaciamento

Os métodos usuais de análise de amaciamento são geralmente invasivos e inviáveis no contexto de máquinas herméticas, já que seria preciso romper o selo do dispositivo, um processo que é normalmente irreversível. Mesmo em casos em que seja possível desmontar os componentes para reconhecimento das superfícies de contato, a remontagem do sistema alteraria o posicionamento do contato, mesmo que em nível microscópico, causando um novo processo de amaciamento na operação (Blau, 2005). Assim, faz-se necessária a avaliação de grandezas que possam indicar indiretamente essas mudanças na superfície, no atrito e no desgaste dos componentes.

De acordo com Blau (2009), poucos métodos de avaliação indireta do processo de amaciamento são explicitamente descritos na literatura, sendo esses a análise da vibração (Martin, 1992), da corrente elétrica do motor (Eissenberg e Haynes, 1992) e da composição do lubrificante (Lockwood e Dalley, 1992). A análise do lubrificante, porém, requer acesso contínuo ao fluido e equipamentos adequados de ferrografia analítica, não sendo adequada à aplicação em compressores herméticos. Os demais métodos são brevemente descritos a seguir.

Eissenberg e Haynes (1992) propõem a análise do sinal de corrente elétrica como uma inferência da carga mecânica do sistema. No trabalho, são propostas duas formas de análise do sinal de corrente elétrica, a partir do seu valor médio, como um indicativo da média da carga total do dispositivo, e das flutuações instantâneas sobrepostas à média, refletindo as flutuações na carga. No caso de motores de corrente alternada, a análise é realizada a partir do valor eficaz (RMS, do inglês *root mean square*) da corrente elétrica, e mudanças graduais nesse valor podem refletir

alterações no coeficiente de atrito. Da mesma forma, as flutuações instantâneas na corrente elétrica também podem refletir flutuações no atrito. Em ambos os casos, as alterações no comportamento tribológico podem ser um indicativo dos efeitos do amaciamento (Blau, 2009).

Martin (1992) apresenta como alternativa para análise do atrito a avaliação da curtose da vibração no sistema. No caso do amaciamento de rolamentos, o autor demonstra que à medida que o sistema é operado a curtose se aproxima de três, indicando que a distribuição de asperidades se aproxima de uma distribuição normal com o processo de amaciamento.

O trabalho de Barros (2019) discorre sobre a capacidade de elevação de pressão de compressores herméticos alternativos e sua relação com o amaciamento. Tal capacidade é estudada como um representativo da capacidade de refrigeração do dispositivo, que, por definição, é proporcional à vazão mássica por ele gerada. O consumo do compressor, proporcional à corrente elétrica requerida para sua operação, também é avaliado em ensaios de desempenho energético (Coral et al., 2019). Assumindo que as temperaturas e pressões são constantes para compressores sob ensaio em laboratório, podem-se considerar tais grandezas como possíveis estimadores do processo de amaciamento em compressores.

Dado esse levantamento, foi implementada uma bancada capaz de obter as grandezas identificadas como relacionadas ao fenômeno. Essa bancada é descrita na Seção 3.

3. BANCADA DE AVALIAÇÃO DO AMACIAMENTO

Uma bancada automática para avaliação do amaciamento foi projetada e construída neste trabalho. O diagrama da mesma é apresentado na Figura 2. Tal modelo de bancada é uma atualização da bancada implementada por Thaler (2019), trabalho que descreve também o processo de modelagem do sistema, o ajuste dos controladores e a escolha de componentes utilizados.

A bancada foi proposta para operação em ciclo quente, sem função de refrigeração. Além do compressor (1) e das válvulas para controle da pressão de sucção (2) e de descarga (3), a bancada inclui uma etapa auxiliar com um reservatório (4) para armazenamento do excesso de fluido refrigerante, com visor de líquido (5) em paralelo para monitoramento de fase. O trocador de calor (6) com ventilador acoplado (7) no circuito auxiliar evitam superaquecimento e forçam o fluido em excesso para o reservatório. As válvulas manuais (8) são utilizadas para carregamento de fluido e manutenção da bancada.

As pressões na bancada foram medidas utilizando transdutores piezorresistivos, e as temperaturas com termorresistores Pt100. A pressão de descarga foi controlada utilizando controle em cascata, com um controlador proporcional na malha interna para controle da posição da válvula motorizada (3) e um controlador Proporcional-Integral (PI) na malha externa para controle da pressão em função da posição da válvula, mantendo a condição com variações de ordem de 0,5% em torno da referência em regime permanente. A pressão de sucção, por sua vez, foi controlada em uma malha única com um controlador

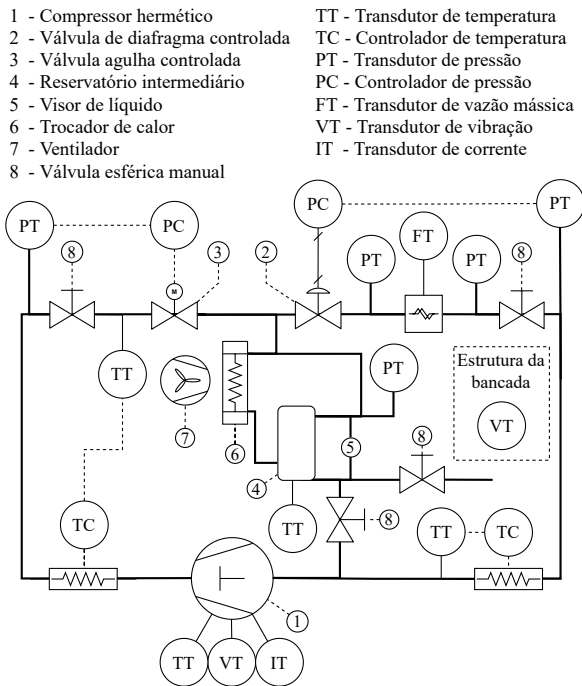


Figura 2. Diagrama da bancada automática de avaliação do amaciamento.

PI, e com a abertura da válvula (2) regulada em função de um sinal de tensão, e permite controle da pressão com variações na ordem de 1% em regime permanente. As temperaturas de descarga e de sucção são controladas manualmente, empregando resistores como atuadores.

Para medição das grandezas possivelmente relacionadas ao amaciamento, foram instrumentados dois acelerômetros no corpo do compressor, em eixos perpendiculares e calotas opostas, com o eixo lateral medido na calota inferior e o eixo longitudinal medido na calota superior do dispositivo. Um acelerômetro *dummy* também foi acoplado à estrutura da bancada para evitar que perturbações externas sejam atribuídas à operação do dispositivo. A medição de vazão mássica é realizada com um medidor de vazão Coriolis, e um transdutor de efeito Hall permite o monitoramento da corrente elétrica do compressor. Para monitoramento das condições do compressor e da bancada foram adicionados dois transdutores de pressão no circuito auxiliar. A temperatura, além de medida para controle das temperaturas de sucção e de descarga, é monitorada na calota inferior do compressor e no reservatório auxiliar.

Nas Figuras 3(a) e 3(b) são apresentadas, respectivamente, a vista em perspectiva e lateral da bancada implementada, a última com foco no circuito auxiliar. Na Figura 3(c) é apresentado o compressor instrumentado, com ênfase nas conexões de fluido e nos transdutores. A conexão de processo é internamente ligada à conexão de sucção, e é utilizada para retorno manual de óleo lubrificante.

Foram realizados ensaios com três unidades de um modelo de compressor hermético alternativo com capacidade de refrigeração fixa, doravante denominadas Unidade 1, Unidade 2 e Unidade 3. Para cada unidade foram realizados três ensaios, considerando o primeiro como o ensaio de amaciamento, e os outros dois como ensaios com a unidade já amaciada. A duração dos ensaios foi estabelecida em

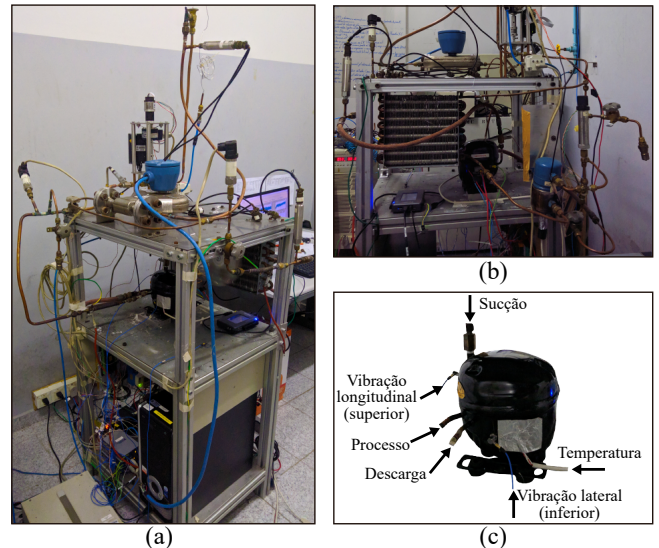


Figura 3. Fotos da bancada de amaciamento: (a) vista em perspectiva; (b) vista lateral do circuito auxiliar; (c) compressor instrumentado.

função de dados experimentais, que mostraram que 24 h garantem com confiança o amaciamento do modelo.

Os dados de cada unidade foram comparados, buscando avaliar a diferença no comportamento durante o ensaio de amaciamento e durante os ensaios com a unidade já amaciada. Em todos os ensaios o assentamento dos valores analisados de corrente ocorreu após os de vazão, colocando a primeira como um possível indicativo do instante a partir do qual poderiam ser realizados ensaios de desempenho com a unidade.

A análise do valor eficaz, da curtose e da variância da corrente elétrica também mostrou padrões visivelmente atribuíveis ao amaciamento, apresentando valores superiores nas horas iniciais do ensaio de amaciamento em comparação aos ensaios posteriores. Essa diferença é destacada na Figura 4, na qual é apresentado o valor eficaz da corrente nos ensaios.

Na Figura 4 é possível observar nos ensaios de amaciamento da Unidade 1 e da Unidade 3 uma queda súbita em torno de 12h de ensaio, a partir da qual o sistema permanece em regime permanente. A Unidade 2, apesar de não apresentar queda súbita nos valores, também possui valores iniciais mais elevados no ensaio de amaciamento, porém com assentamento mais suave e, aproximadamente, entre as 4h e 6h de ensaio, mais rápido do que o observado nas outras unidades. Comportamentos similares foram observados também na variância e na curtose da corrente elétrica. Assim, tais instantes de transição foram considerados como base para avaliação dos métodos de detecção, descritos na Seção 4.

4. MÉTODO PROPOSTO

Para adequar os dados das séries temporais obtidas nos ensaios a modelos de detecção do amaciamento, foi utilizado o método de construção de *features* por *rolling window*, analisando valor eficaz, de curtose e de variância da corrente e da vibração a cada um minuto de ensaio,

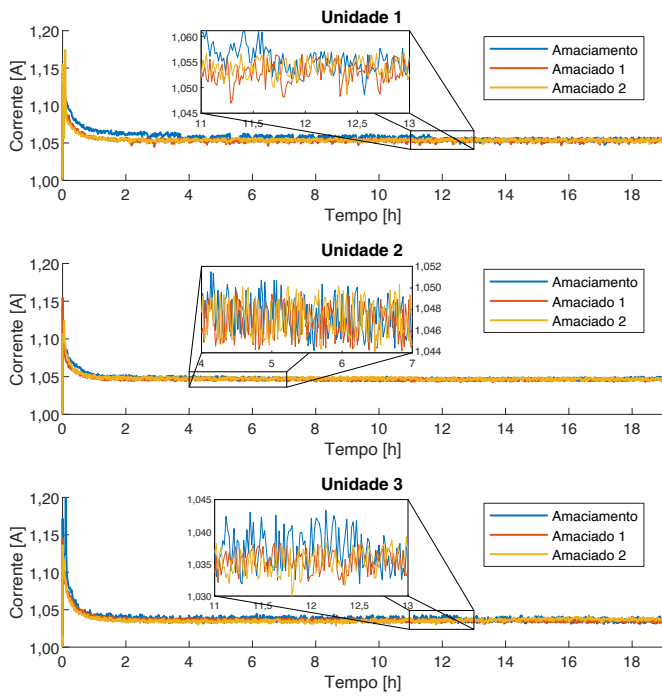


Figura 4. Valor eficaz da corrente elétrica do motor dos compressores para ensaios de amaciamento e com compressores já amaciados.

além de valores de vazão adquiridos também nessa taxa. Devido aos picos na partida do compressor e ao período transitório natural dos ensaios com esses dispositivos (Penz et al., 2012), foram utilizadas apenas medições coletadas a partir do encerramento da primeira hora de ensaio.

Para suavização das séries, foi utilizado filtro de média móvel com janela M . Para construção das *features* foi, então, utilizada uma janela de N momentos, espaçados entre si por D amostras. Assim, sendo $x(k)$ o valor de uma das séries avaliadas no instante k e $\hat{x}(k)$ o seu valor filtrado naquele instante, podem-se definir:

$$\hat{x}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(k-i), \text{ e} \quad (1)$$

$$\hat{X}(k) = [\hat{x}(k), \hat{x}(k-D), \hat{x}(k-2D), \dots, \hat{x}(k-(N-1)D)],$$

com $\hat{X}(k)$ sendo o vetor de observações filtradas para cada instante k . Considera-se que o ensaio se inicia no instante $k = 1$, assim quando $k < 1$ para valores $x(k)$ no filtro de médias móveis, a janela de filtragem é reduzida para o maior valor condizente, e $\hat{X}(k)$ só é definido para $k > (N-1)D$.

Para identificação do amaciamento é necessário ainda o desenvolvimento de métodos que, a partir dos agrupamentos gerados pelo método k-médias, definam se o compressor está ou não amaciado naquele instante. Tais métodos devem considerar que, mesmo que o amaciamento ocorra apenas uma vez na vida do dispositivo, existe um período transitório em grandezas suscetíveis às variações de pressão e temperatura no dispositivo. Dessa forma, todo ensaio deve iniciar classificado como “não amaciado” e em um dado momento passar para o estado “amaciado”, sem

retornar ao estado anterior. Assim, foram desenvolvidos três métodos automáticos para interpretação dos agrupamentos. Inicialmente, o ensaio é dividido em janelas não sobrepostas de mesma duração W . Dentro de cada janela, a proporção de um determinado grupo c é a razão entre o número de amostras do grupo e o total de amostras da janela. Os métodos são:

- I - Grupo dominante:** o compressor está em estado “amaciado” a partir da janela em que a proporção de um determinado grupo c é superior àquela dos outros grupos. Esse método se baseia na hipótese de que tal estado é indicado pela prevalência de um grupo apenas.
- II - Limite superior:** o compressor está em estado “amaciado” a partir da janela em que a proporção de um determinado grupo c é superior a um dado limiar l . Esse método parte da suposição que a ocorrência frequente de um grupo pode indicar o fim do amaciamento no compressor.
- III - Limite inferior:** o compressor está amaciado a partir da janela em que a proporção de um determinado grupo c é inferior a um dado limiar l . Esse método se baseia na suposição de que o processo de amaciamento é indicado pela ocorrência de um grupo, e quando tal grupo passa a ocorrer com frequência inferior, é um indicativo do fim do processo.

Todos os métodos requerem a duração da janela W e o grupo de análise c definidos a priori. Adicionalmente, os métodos II e III requerem a escolha do limiar l . Propõe-se a escolha experimental desses parâmetros, como descrito na Seção 5.

Para aceitação do método como possível indicativo do amaciamento, foram utilizados os critérios abaixo.

- C1** O estado “amaciado” deve ser detectado em todos os ensaios.
- C2** Se, para uma dada unidade, a transição do estado “não amaciado” para “amaciado” ocorrer antes em ensaios de amaciamento do que em ensaios já amaciados, o método é considerado inválido.
- C3** Em ensaios com compressores já amaciados, o instante de transição para “amaciado” não deve ultrapassar idealmente a duração do período transitório natural do ensaio. Como essa duração pode chegar a 90 min em bancadas de ensaios (Penz et al., 2012), e considerando que algumas combinações de parâmetros utilizadas podem gerar resultados somente a partir de 4 h do início do ensaio, definiu-se 5 h como o instante máximo de transição para ensaios com compressores já amaciados.
- C4** Conforme apresentado na Seção 3, os ensaios de amaciamento realizados com a Unidade 1 e a Unidade 3 apresentaram transições relacionadas à corrente elétrica do motor em instantes próximos a 12 h de ensaio. Considerando possíveis divergências na detecção devido à configuração do método, assumiu-se que detecções válidas deveriam apontar a transição para o estado “amaciado” em tais unidades em instante superior a 10 h. As transições de corrente elétrica na Unidade 2 ocorrem em instantes anteriores, e assumiram-se como válidas aquelas transições que foram detectadas após, no mínimo, 4 h nesse ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo k-médias requer como parâmetro o número de partições para agrupamento. Esse número foi definido utilizando o método *Elbow*, que se baseia no formato da curva da soma do erro quadrático em função do número de grupos (Uhlmann et al., 2018). Para os dados do amaciamento, o número encontrado foi de três grupos, que foram nomeados de Grupo 1, Grupo 2, e Grupo 3, de acordo com a ordem de surgimento no ensaio de amaciamento. O algoritmo também requer a escolha do método de inicialização dos centroides e a função custo a ser minimizada, que neste trabalho foram, respectivamente, o método k-médias++ (Arthur e Vassilvitskii, 2007) e a distância euclidiana entre os pontos e os centroides.

Para avaliação do efeito dos parâmetros de construção dos vetores no resultado final, foi realizada uma busca em grade com as seguintes configurações:

- $M = \{1; 5; 10; 30\}$ amostras;
- $N = \{1; 3; 5\}$ amostras;
- $D = \{1; 10; 30\}$ amostras.

Os parâmetros dos métodos de identificação do amaciamento foram também avaliados a partir de busca em grade, com janelas de 30 min, 1 h e 2 h. Os limiares para o método II foram analisados no conjunto $\{0,1; 0,2; \dots; 1\}$, e para o método III no conjunto $\{0; 0,1; \dots; 0,9\}$.

Os limites superiores dos parâmetros para busca foram definidos heurísticamente, avaliando o efeito de diferentes janelas de filtro na forma da curva dos dados. Também se buscou evitar combinações de parâmetros que resultassem em um tempo inicial de análise maior que 4 horas, definido com base no tempo mínimo de amaciamento observado em ensaios industriais. Esse tempo inicial é dado como o primeiro instante em que $\hat{X}(k)$ é definido (vide equação (1), Seção 4) somado à parcela de 1 h de dados descartados. Assim, como as grandezas são amostradas a cada 1 min e a primeira hora de medições é descartada, o tempo inicial máximo da busca realizada é de 3 h e 1 min, para os casos em que $N = 5$ e $D = 30$.

Dentre todas as combinações avaliadas, 33 atenderam aos 4 critérios propostos na Seção 4, dentre as quais:

- 19 utilizam o método II aplicado na curtose da corrente elétrica;
- 8 utilizam o método II aplicado no valor eficaz da corrente elétrica;
- 4 utilizam o método II aplicado na variância da corrente elétrica;
- 1 utiliza o método III aplicado na variância da corrente elétrica;
- 1 utiliza o método II aplicado na curtose da vibração na calota superior do compressor.

É possível observar que a maioria (97%) das combinações que atenderam a todos os critérios utiliza a corrente elétrica como grandeza para detecção, sendo 59% dessas com a curtose, 25% com o valor eficaz e 16% com a variância. Dentre os métodos propostos, 97% dos resultados aceitos foram obtidos utilizando o método II e 3% utilizando o método III.

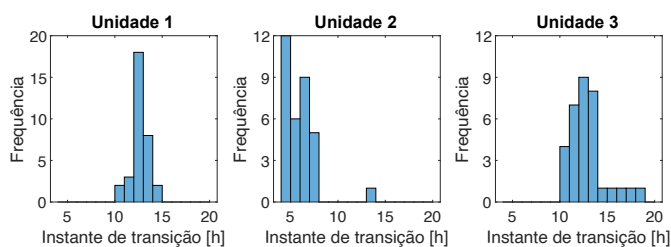


Figura 5. Frequência do instante de transição para o estado “amaciado” em ensaios de amaciamento para métodos válidos.

Quanto às combinações de parâmetros, a maioria das configurações que retornaram resultados válidos considera $M = 1$, valores intermediários para D e valores médios e altos para N . Todas as combinações aceitas também utilizam limiares $l \geq 0,6$ e $W \geq 1,5$ h.

Na Figura 5 é apresentada a distribuição dos instantes de transição detectados pelos métodos válidos. É possível observar que as observações intuídas a partir das medições de corrente propostas na Seção 3 são reforçadas pela maioria dos métodos, que indicam o fim do amaciamento em torno de 12 h para a Unidade 1 e a Unidade 3, e entre 4 h e 6 h para a Unidade 2.

Conforme apresentado na Seção 3, o máximo tempo entre o assentamento do valor eficaz da corrente elétrica (representativo do consumo da unidade) e o da vazão mássica (representativo da capacidade de refrigeração da unidade) ao longo dos ensaios foi de 12 h para a Unidade 1, 5 h para a Unidade 2, e 12 h para a Unidade 3. Considerando tais valores como o instante real de transição do estado “não amaciado” para “amaciado”, foram encontradas 12 combinações que resultam em raiz do erro quadrático médio menor que 1,5 h. A combinação com menor erro (0,4 h) é a do método II aplicado no Grupo 3 do agrupamento pela curtose da corrente elétrica, com parâmetros $N = 5$, $M = 1$, $D = 10$, $W = 0,5$ e $l = 0,1$. Os dados instantâneos do ensaio de amaciamento da Unidade 1 em cada grupo e a respectiva proporção de grupos por janela são apresentados na Figura 6. É possível observar em 12 h o instante em que a proporção do Grupo 3 ultrapassa o limiar, indicando o instante de transição para o estado “amaciado”.

6. CONCLUSÃO

Buscando explorar o fenômeno do amaciamento em compressores herméticos alternativos, foi implementada uma bancada de ensaios capaz de controlar as condições de operação dos dispositivos. Nessa bancada foram realizados ensaios de amaciamento com três unidades de compressores. A partir dos dados de corrente elétrica, vibração e vazão obtidos nesses ensaios foram explorados possíveis métodos de detecção da transição do estado “não amaciado” para “amaciado” utilizando o algoritmo k-médias para agrupamento não supervisionado das medições.

Foram propostos três métodos para detecção dessa transição, que foram analisados em diversas combinações de parâmetros e avaliados à luz de um conjunto de critérios estabelecidos com base em definições do fenômeno do amaciamento e em dados experimentais. Um desses métodos destacou-se como o mais condizente com os dados

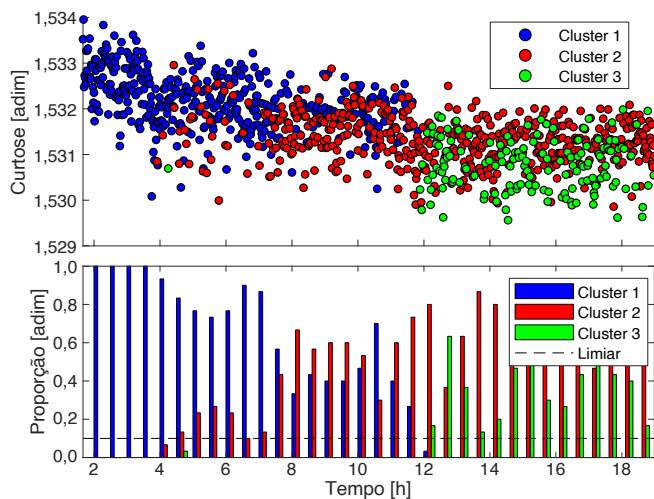


Figura 6. Agrupamento e ilustração do método II para os dados de curtose da corrente elétrica do motor no ensaio de amaciamento da Unidade 1, com $N = 5$, $M = 1$, $D = 10$, $W = 0,5$ e $l = 0,1$.

experimentais, e define o instante de amaciamento como o instante em que a proporção de um dado grupo numa janela de tempo ultrapassa um limiar preestabelecido. Tal método aplicado em dados da corrente elétrica do motor indicou resultados condizentes com valores experimentais, sugerindo que tal grandeza é uma variável adequada para monitoramento do amaciamento de compressores. Dentre os valores derivados da corrente elétrica, a curtose foi o que melhor representou o fenômeno nas configurações avaliadas.

Tais resultados apresentam um avanço nos estudos de detecção indireta do amaciamento, especialmente na indústria de compressores herméticos alternativos, dado que os trabalhos são escassos e que existe demanda pela exploração do tema. Futuros trabalhos explorarão o uso dos métodos de classificação não supervisionada propostos em outros modelos de compressores e desenvolverão, a partir desses métodos, formas de identificação on-line do final do período de amaciamento.

REFERÊNCIAS

Ahmed, M., Seraj, R., e Islam, S.M.S. (2020). The k-means algorithm: A comprehensive survey and performance evaluation. *Electronics (Switzerland)*, 9(8), 1–12.

Arthur, D. e Vassilvitskii, S. (2007). K-means++: The advantages of careful seeding. In *Proceedings of the Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 1027–1035.

Barros, V.T. (2019). *Desenvolvimento de ferramentas baseadas em redes neurais artificiais para inferência de parâmetros de desempenho de compressores herméticos por meio de ensaios de capacidade de elevação de pressão*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Blau, P.J. (2009). *Friction science and technology: from concepts to applications*. CRC Press, Boca Raton, USA, 2 edição.

Blau, P.J. (1991). Running-in: Art or engineering? *Journal of Materials Engineering*, 13(1), 47–53.

Blau, P.J. (2005). On the nature of running-in. *Tribology International*, 38(11-12 SPEC. ISS.), 1007–1012.

Coral, R., Flesch, C.A., e Flesch, R.C.C. (2019). Measurement of refrigeration capacity of compressors with metrological reliability using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(12), 9928–9936.

Dowson, D., Taylor, C., e Godet, M. (1982). The running-in process in Tribology - Proceedings of the 8th Leeds-Lyon Symposium on Tribology held in the Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France (September 1981). In *Tribology International*, volume 15, 264.

Eissenberg, D. e Haynes, H. (1992). Motor-current signature analysis. In *ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, Materials Park, EUA.

Khonsari, M., Ghatrehsamani, S., e Akbarzadeh, S. (2021). On the running-in nature of metallic tribo-components: A review. *Wear*, 474–475(Dec. 2020), 203871.

Lockwood, F. e Dalley, R. (1992). Lubricant analysis. In *ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, Materials Park, EUA.

Martin, H. (1992). Vibration analysis. In *ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, Materials Park, EUA.

Martins, E.F., Flesch, C.A., Flesch, R.C., e Borges, M.R. (2011). Conception of a test bench to generate known and controlled conditions of refrigerant mass flow. *ISA Transactions*, 50(3), 513–520.

Penz, C.A., Flesch, C.A., Nassar, S.M., Flesch, R.C., e de Oliveira, M.A. (2012). Fuzzy-bayesian network for refrigeration compressor performance prediction and test time reduction. *Expert Systems with Applications*, 39(4), 4268–4273.

Ruggiero, A., Di Leo, G., Liguori, C., Russo, D., e Sommella, P. (2020). Accurate Measurement of Reciprocating Kinetic Friction Coefficient through Automatic Detection of the Running-In. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(5), 2398–2407.

Schmitz, F. (2014). *Desenvolvimento e validação experimental de um padrão de intercomparação para verificação de bancadas de ensaio de eficiência energética de compressores de refrigeração na indústria*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Thaler, G. (2019). *Projeto e implementação de uma bancada experimental para determinação do perfil de amaciamento em compressores herméticos alternativos*. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal de Santa Catarina.

Uhlmann, E., Pontes, R.P., Geisert, C., e Hohwieler, E. (2018). Cluster identification of sensor data for predictive maintenance in a Selective Laser Melting machine tool. *Procedia Manufacturing*, 24, 60–65.

Zambrano, O.A., Muñoz, E.C., Rodríguez, S.A., e Coronado, J.J. (2020). Running-in period for the abrasive wear of austenitic steels. *Wear*, 452-453.