

ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE EQUIPAMENTOS NA FASE DE DESENVOLVIMENTO ATRAVÉS DE MODELOS DE DEGRADAÇÃO

Diego Silva Ilha (PUCRS)

diegoilha@hotmail.com

Jairo Jose de Oliveira Andrade (PUCRS)

jairo.andrade@pucrs.br



Esse artigo aborda a análise de degradação de um componente que está em fase de desenvolvimento de um equipamento industrial quando empregado em dois processos de fabricação, construindo modelos de degradação e estimando o tempo de vida útil do mesmo. Foram realizadas ao longo de doze semanas coletas de dados de vazão do equipamento. Com esses dados, utilizando conceitos de estatística (regressão), foi possível criar um modelo de degradação para cada situação, estimando o tempo de vida do componente. Esse tempo de vida serve para definição de um esquema de manutenção preventiva do equipamento, evitando que ocorra a falha do mesmo e recuperando a sua funcionalidade definida em projeto.

Palavras-chaves: Degradação, modelagem, vida útil

1. Introdução

Com a intensificação de uma economia globalizada, houve também um crescimento na demanda por equipamentos e sistemas com melhor desempenho aliado ao baixo custo. Também surgiu a necessidade de redução na probabilidade de ocorrência de falhas nos produtos, considerando que essas falhas podem levar a um aumento dos custos dos produtos ou até acidentes. Com a análise e minimização dos diversos tipos de falhas, busca-se o aumento da confiabilidade dos equipamentos (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

De acordo com Anzanello et al. (2003), a confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema operar de maneira satisfatória (sem falhas) em um período de tempo conhecido e condições definidas no projeto. Em algumas situações, a confiabilidade deve ter um nível extremamente alto, pela consequência que a falha pode ocasionar. As ocorrências de falhas são toleradas em algumas situações, mas podem gerar danos à imagem de uma empresa.

Assim, a falha pode ser definida como uma inoperância de um produto, que não executa a função para a qual foi projetado (WUTTKE e SELLITO, 2008). Uma falha pode gerar uma situação indesejada como uma simples parada de máquina, prejuízos financeiros, e até algo pior como o risco de vidas humanas. Logo, não devem ser poupados esforços para minimizar e evitar os riscos de uma falha (LAFRAIA, 2001).

Uma análise de falhas tem como objetivo determinar a taxa de falhas e o tempo médio entre as falhas de um equipamento, sendo que a realização dessa análise depende dos dados coletados ou através de ensaios. Estudos de confiabilidade vem sendo aplicados em diversos setores, como a engenharia eletrônica, computacional, sistemas mecânicos, energéticos, e também, na engenharia de manutenção (ANZANELLO *et al.*, 2003)

Com a atual necessidade de rapidez no desenvolvimento de novos produtos, os testes de confiabilidade são realizados com intervalos de tempo cada vez mais reduzidos. Normalmente são usados testes de vida de componentes, que buscam o tempo até a falha, para assim, conseguir definir a confiabilidade do produto ou componente. Mas em algumas situações não ocorrem falhas, o que acaba por dificultar a estimativa da confiabilidade. No entanto, é possível estimar o tempo até a falha através da análise de degradação de componentes, construindo um modelo e estimando a distribuição de tempo até a ocorrência da falha. Com isso, o tempo de vida pode ser estimado sem a necessidade de ocorrência de falha (POHL *et al.*, 1998).

A análise de degradação (onde há pouca ou a não ocorrência de falha) pode proporcionar mais informação do que dados de tempo até a falha. A análise de degradação permite modelagem direta da causa da falha, e ainda há maior credibilidade, confiabilidade e uma base firme para estudos, em substituição aos testes acelerados de confiabilidade (HAMADA e MEEKER, 1995).

Tendo em vista este tema, o presente artigo tem como objetivo principal realizar uma análise de degradação dos filtros de um equipamento industrial, produto este que está sendo desenvolvido e em processo de patente, buscando estimar a vida útil do mesmo até a ocorrência de falha e, assim, estimar qual o tempo mais adequado para a sua substituição.

Para tanto, pretende-se encontrar o modelo de degradação mais adequado para cada situação, validando-o com o auxílio de ferramentas estatísticas de critério de decisão.

Esse artigo está voltado somente para análise de degradação e definição do tempo de vida do filtro de um coletor de névoa de óleo. Não serão abordados nesse trabalho assuntos como custos de manutenção do equipamento (materiais e mão-de-obra), degradação de outros componentes (além do filtro), manutenção de outros componentes.

2. Revisão Bibliográfica

Para Pohl et al. (1998), um modelo de degradação pode ser definido como a representação de uma ou um conjunto de curvas que mostram o aumento da degradação de um produto em função do tempo, apresentando a degradação física ou queda de performance de um produto ao longo do tempo (VIANEI, 2008). Quando há dificuldade para observar a degradação física de um produto, podem ser coletadas informações de degradação do desempenho do mesmo (SILVA e MATTOS, 2001). Oliveira (2011) comenta que as técnicas convencionais de análise de falha não se aplicam quando a incidência das mesmas é pequena ou praticamente nula. Em casos como estes podem ser empregados os modelos de degradação, que possuem como dado experimental não a falha em si, mas sim alguma característica mensurável a ela atrelada, a qual quando monitorada torna possível melhorias significativas nas estimativas das quantidades de interesse.

Se algumas unidades de um mesmo produto forem testadas em um mesmo processo, com as mesmas condições de trabalho, ou seja, no mesmo cenário, possivelmente ter-se-ia um modelo idêntico de degradação para todos os equipamentos. A tendência seria que as falhas ocorressem aproximadamente no mesmo intervalo de tempo para todos os equipamentos (VIANEI, 2008). Sendo assim, haveria um padrão nas medidas de desempenho e degradação dos equipamentos (POHL *et al.*, 1998).

Todavia, um modelo de degradação de um mesmo equipamento pode sofrer complicações quando o mesmo opera em condições e processos diferentes. Desta forma, o modelo não será igual para todos os equipamentos, cujas informações de degradação ajudam na busca dos prováveis tempos de falha, quando os testes realizados não apresentaram falhas.

Os equipamentos em observação e/ou em produção podem ser submetidos a ensaios não acelerados e acelerados. Em ensaios não acelerados, os equipamentos são monitorados em condições normais de uso. Já no ensaio acelerado, há a inclusão de fatores de estresse, como temperatura, voltagem, entre outros (POHL *et al.*, 1998; VIANEI, 2008; FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).

Para Silva e Mattos (2001), os dados de degradação ao longo do tempo podem ter três tipos de comportamento, sendo eles de forma linear, côncavo ou convexo. Linear quando a degradação é diretamente proporcional ao tempo. Já o modelo côncavo (que pode ser expresso através da expressão da raiz quadrada do tempo) ocorre quando há uma rápida degradação no início, mas esta diminui ao longo do tempo. No comportamento convexo a degradação é lenta no início, mas aumenta rapidamente no decorrer do uso (similar a um comportamento exponencial). No item seguinte será apresentado o modelo geral de degradação utilizado por Viane (2008), que pode ser utilizado em diversos casos.

2.1 Modelo geral de degradação

A modelagem geral de degradação utilizada por Viane (2008) consiste na degradação observada y_{ij} ao longo do tempo t_{ij} . O perfil da degradação D_{ij} é estimado ao longo do tempo (t_{ij}), sendo $t > 0$. Deve-se considerar uma amostra de “n” equipamentos em “m” instantes independentes. A notação é definida conforme apresentado na Equação 1.

$$y_{ij} = D_{ij} + e_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m_i \quad (1)$$

Onde $D = D(t_{ij}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{ki})$ é o perfil de degradação do equipamento i até o tempo j . Já $\varepsilon_{ij} \sim \text{Normal}(0, \sigma^2_\varepsilon)$ é o erro residual correspondente ao equipamento i no tempo j . Para Silva e Mattos (2001), as unidades ($\beta_{1i}, \dots, \beta_{ki}$) são consideradas um vetor de “k” parâmetros desconhecidos, normalmente valores de 1 a 4, que variam de unidade para unidade. O tempo t pode ser o tempo real, tempo de operação, ou alguma outra medida apropriada de uso como, por exemplo, quilometragem ou número de ciclos (VIANE, 2008).

2.2 Análise de degradação aproximada

Segundo Viane (2008), há um método de análise de dados da degradação que separa a análise para cada tipo de amostra, no qual um modelo é ajustado para cada situação através do método dos mínimos quadrados. Para Pohl *et al.* (1998), a equação 2 representa a forma geral do modelo.

$$y = a + b.t \quad (2)$$

Onde:

y é a degradação;

a é o parâmetro que representa a escala de degradação.

b é o parâmetro que forma a curva de degradação.

t é o período de tempo da degradação.

Segundo os autores, o método dos mínimos quadrados adota como estimativas das variáveis a e b do modelo valores que possam minimizar a soma dos quadrados dos desvios. Esse modelo pode ser utilizado em ensaios não acelerados, ou seja, em condições normais de operação.

2.3 Degradação não-linear

Quando um modelo linear não está adequado a realidade da situação, busca-se um ajuste de uma curva no modelo, conhecido como regressão não-linear (FREUND e SIMON, 2000), empregando-se o método dos mínimos quadrados para a realização dos ajustes. A regressão não-linear pode ser apresentada de diversas formas, como a polinomial (Equação 3), logarítmica (Equação 4), exponencial (Equação 5) e a lei da potência (Equação 6).

$$y = a + b.t + c.t^2 \quad (3)$$

$$y = b.Ln(t) + a \quad (4)$$

$$y = a.e^{(-b.t)} \quad (5)$$

$$y = a.t^{(b)} \quad (6)$$

2.4 Critérios de escolha do modelo

Existem critérios que ajudam na construção e também na escolha do modelo de regressão (ou degradação) mais adequado entre os modelos disponíveis. Os critérios que foram utilizados nesse trabalho são R^2 ajustado e o RMSE (*root mean square error* – raiz quadrada do erro do quadrado médio), cujos os mesmos serão descritos nos próximos itens.

2.4.1 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação R^2 mostra se o modelo proposto se ajusta adequadamente aos dados. O R^2 tem valor entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 a curva estará bem ajustada aos dados; conseqüentemente, quanto mais longe de 1 e próximo de 0, menor é a relação entre a curva e os dados (GUJARATI, 2005). O valor do coeficiente R^2 pode ser obtido pela equação 7.

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (7)$$

Sendo:

SQR = Soma dos Quadrados do Resíduo.

SQT = Soma dos Quadrados Total.

O R^2 é o coeficiente com maior utilização para definir o grau de ajuste de uma curva de um modelo de regressão. Mede o percentual de variação total de y explicada pelo modelo de regressão (GUJARATI, 2005).

2.4.2 Coeficiente de determinação ajustado (R^2 Ajustado)

Assim como o R^2 , o R^2 ajustado é um coeficiente de determinação. O R^2 ajustado segue o mesmo conceito do R^2 , mas há um ajuste para os graus de liberdade associados às somas de quadrados. Esse coeficiente de determinação pode ser obtido pela equação 8.

$$R^2_{Ajus.} = 1 - \frac{\sum \hat{u}_i^2 / (n - k)}{\sum y_i^2 / (n - 1)} \quad (8)$$

Onde:

k = número de parâmetros do modelo.

2.4.3 Raiz quadrada do erro do quadrado médio (RMSE)

A raiz quadrada do erro do quadrado médio (*root mean square error* - RMSE) é uma medida de acurácia de um modelo, que pode ser considerada absoluta e dependente de escala. Velasco (2008) comenta que o critério de decisão para comparação entre modelos é a escolha da formulação que obteve o menor valor do RMSE. O valor de RMSE é obtido através da raiz quadrada do erro médio quadrado (*mean square error* - MSE). Tal parâmetro é empregado para avaliação de modelos em diversas áreas do conhecimento, como na Economia (DINIZ, 2011), na área de Recursos Hídricos (GUMIERE *et al.*, 2006) e na Engenharia Civil (KRÜGER e PAPST, 2003).

Desta forma, a aplicação de ferramentas estatísticas é de fundamental importância para a adequada modelagem do comportamento de sistemas e/ou desempenho de produtos na fase de desenvolvimento ou operação, a fim de identificar o momento mais adequado para a realização de atividades de manutenção, levando-se em consideração que não há a disponibilidade de dados de falha para a realização de análises mais detalhadas.

3. Procedimento de análise

3.1 Descrição do equipamento desenvolvido

O coletor de névoa de óleo com filtração foi um produto desenvolvido por uma empresa localizada em Porto Alegre com o objetivo de diminuir a poluição interna em uma indústria, que é normalmente provocada pela geração de névoa durante um processo de produção. O equipamento está sendo utilizado em sua maior parte na indústria metal-mecânica, onde há processos de usinagem, têmpera e lavagem de peças. Durante o processo de produção, as máquinas utilizam óleo de corte para resfriamento das ferramentas e das peças em processamento. Esse óleo, em forma de névoa, escapa do interior da máquina de usinagem e se dispersa pela atmosfera da empresa, contaminando o piso, a carenagem das máquinas, o interior de quadros elétricos, entre outros locais. Com isso há riscos de acidentes, problemas na vida útil das instalações, necessidade de paradas para manutenção e limpeza de quadros elétricos e sistemas eletrônicos das máquinas. Essa névoa de óleo também causa danos na saúde dos funcionários, como doenças respiratórias e dermatológicas.

O coletor de névoa desenvolvido tem a função de fazer a sucção da névoa de óleo gerada durante o processo de fabricação, centrifugar essa névoa para que a mesma fique na forma líquida, filtragem do óleo, reter partículas sólidas como cavacos, partículas do rebolo, borras, entre outros, e o retorno desse óleo para o reservatório da máquina operatriz. Com isso, o óleo não se dispersa pela atmosfera da empresa e retorna para o reservatório da máquina, a fim de ser reutilizado.

A sucção de cavacos, borras e partículas de ferramentas de usinagem durante o processo de fabricação provoca a saturação dos filtros, que são elementos internos constituintes do coletor, minimizando a vazão e a filtração no coletor de névoa e, assim, reduzindo a sua vida útil. Um coletor novo tem uma vazão em torno de 30 m³/minuto. O ponto em que o filtro está saturando é quando a vazão é reduzida para 5 m³/minuto, onde admite-se que neste ponto há o ponto de falha e o término da sua vida útil, sendo necessária a troca do filtro. Nesse momento não se tem informações precisas a respeito do tempo necessário para a saturação do filtro, que está associado ao final da sua vida útil. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste em estimar o tempo necessário para a saturação do filtro, que está diretamente associado a processos de fabricação diferenciados, através da criação de modelos de degradação, utilizando regressão linear e não-linear para determinar a vida útil do filtro.

3.2 Método de pesquisa

Para a determinação da vida útil do coletor de névoa de óleo com filtração desenvolveu-se um trabalho de análise constituído por seis etapas. Inicialmente foi feita a descrição geral de utilização desse equipamento nas indústrias, bem como a utilização do mesmo em diferentes processos. A análise dos filtros foi realizada de acordo com cada processo utilizado. Também foi definido o ponto de falha dos equipamentos, no qual admite-se que o mesmo não terá um desempenho aceitável.

Na segunda fase foi realizada a coleta de dados dos filtros em periodicidade semanal nas empresas, durante doze semanas. Foram coletados dados de vazão de ar, em m³/min. A coleta desses dados foi realizada através de um anemômetro digital (Figura 1), que apresenta uma margem de erro de leitura de $\pm 3\%$. Em cada coleta, foram realizadas dez medições em cada equipamento.



Figura 1 - Anemômetro Digital

Após as doze semanas de coletas de dados, os mesmos foram organizados e analisados na terceira fase. Essa análise foi realizada através de *softwares* estatísticos para verificar o comportamento da vazão de cada equipamento ao longo do tempo. Essa análise foi feita individualmente em cada equipamento, também verificando se houve ponto de falha e o porquê dessa falha (se essa ocorreu no filtro ou em outro componente).

Com os dados analisados na terceira fase pôde-se dar início a quarta fase, que consistiu na criação de modelos de degradação para cada filtro. Esses modelos podem definir a vida útil de cada equipamento, e assim definir o tempo de troca para cada situação. Com a criação de cada modelo de degradação, esses foram inseridos no *software* SPSS para verificar se os modelos são significativos.

Na quinta etapa foram realizadas análises objetivando verificar qual o modelo que representasse a saturação do filtro ao longo do tempo para cada processo. Com os modelos de regressão prontos e os valores de R^2 e RMSE, realizou-se a escolha tomando como base a comparação dos parâmetros encontrados.

Na sexta e última fase foram calculados os tempos de vida útil para os filtros em cada cenário. Com os tempos de vida definidos, esses ajudarão as empresas para que possam definir o tempo de troca dos filtros, e assim, recuperar a funcionalidade do equipamento, evitando a quebra de outros componentes, evitar que a névoa de óleo seja inalada pelos operadores e também que a mesma contamine a atmosfera da empresa.

3.3 Processos analisados

Cada equipamento foi observado em um tipo processo de fabricação, sendo em retífica, centro de usinagem, tornos, têmpera e lavadora, que serão descritos a seguir.

3.3.1 Retífica

O processo de usinagem em retífica utiliza óleo de corte e o ferramental de usinagem é composto por rebolos. Os rebolos são discos com material abrasivo, utilizado no desbaste e acabamento das peças em um processo. Durante a usinagem, desprendem-se do rebolo pequenos grãos, que se misturam com o óleo e o cavaco e são sugados pelo coletor. Essas partículas sólidas se depositam no filtro do coletor, e o óleo retorna limpo para o tanque da retífica para ser reutilizado.

3.3.2 Torno em usinagem de ferro fundido sem óleo

No processo de usinagem de ferro fundido normalmente é utilizado óleo de corte e ferramentas de desbaste como insertos. Todavia, existem processos nos quais ao invés de serem empregados óleos de lubrificação utiliza-se uma névoa de óleo, que normalmente esfria as lâminas das ferramentas com 10 vezes mais eficiência que outros métodos, elimina falsos

grupos de corte, remove cavacos para melhorar a vida útil das lâminas em até 60% e reduz o consumo de lubrificante em torno de 90% (SHINGO, 1996). Durante esse processo a névoa do ferro fundido gerada é sugada pelo coletor de névoa.

4. Resultados e discussão

Em relação ao processo de retífica, completadas as doze semanas de coleta de dados, observou-se uma diminuição da vazão ao longo do tempo com um comportamento próximo do linear, mas sem ocorrência falha no equipamento; ou seja, o mesmo não diminuiu a sua vazão ao limite de 5 m³/min, conforme observado na Figura 2.

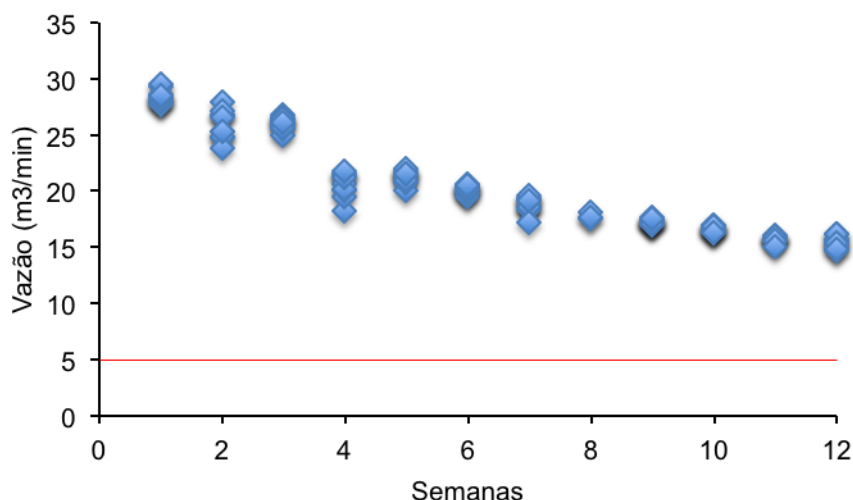


Figura 2 – Comportamento da vazão para o processo de retífica

Para o processo analisado, os valores de R² e RMSE calculados para os modelos estão apresentados na Tabela 1.

Tipo	R ² ajustado	RMSE
Linear	0,887	1,422
Logarítmica	0,926	1,151
Potência	0,912	0,063
Exponencial	0,921	0,055

Tabela 1 – Ajustes encontrados considerando os diversos modelos analisados para o processo de retífica

Conforme apresentado na Tabela 1, o modelo exponencial obteve o coeficiente R² um pouco menor do que o da logarítmica, mas o RMSE muito menor do que a logarítmica. Portanto, esse é o melhor modelo de degradação para o caso da retífica.

Na Tabela 2 está apresentada a análise de variância (ANOVA) referente ao modelo exponencial adotado, na qual verifica-se que o modelo apresenta-se como significativo.

	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p
Regressão	4,366	1	4,366	1387,05	0,000
Resíduo	0,371	118	0,003		

Total 4,737 119

Onde: GDL = graus de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

Tabela 2 – ANOVA para o modelo referente ao processo de retífica

Já em relação ao processo de usinagem sem óleo houve uma redução da vazão ao longo do tempo, como é possível verificar na Figura 3. Observa-se uma degradação mais acentuada nas primeiras semanas, e essa foi reduzindo ao longo do tempo, não ocorrendo a falha do componente dentro do período analisado.

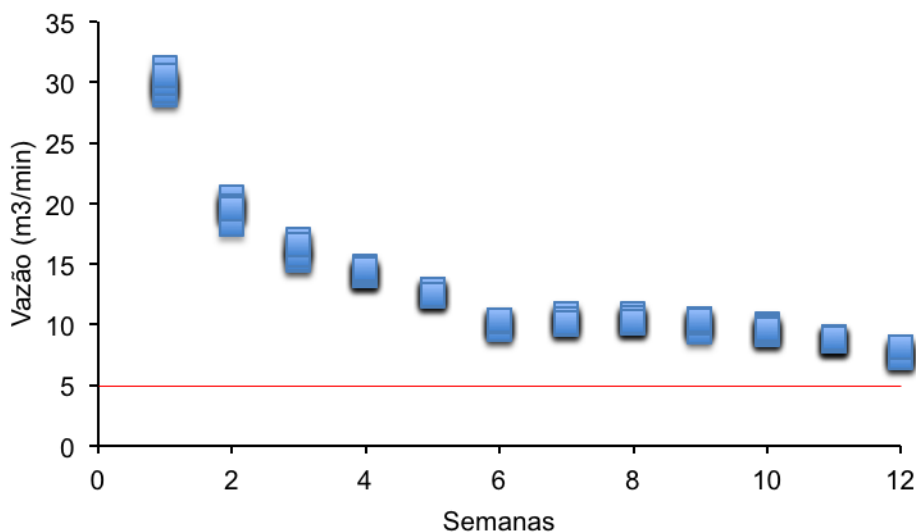


Figura 3 – Comportamento da vazão em função do tempo para o processo de usinagem sem óleo

Os valores obtidos para os parâmetros R^2 e RMSE para o processo analisado estão apresentados na Tabela 3.

Tipo	R^2 ajustado	RMSE
Linear	0,701	3,296
Logarítmica	0,928	1,614
Potência	0,973	0,063
Exponencial	0,841	0,148

Tabela 3 – Ajustes encontrados considerando os diversos modelos analisados para o processo de torno sem óleo

Conforme observado na Tabela 3, o modelo com o maior R^2 e o menor RMSE é da regressão potência, portanto esse é o melhor modelo de regressão para a usinagem sem óleo. Na Tabela 4 está apresentada ANOVA referente ao modelo exponencial adotado, na qual verifica-se que o modelo também apresenta-se como significativo.

	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p
Regressão	15,978	1	15,978	4269,46	0,000
Resíduo	0,442	118	0,004		

Total 16,419 119

Onde: GDL = graus de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

Tabela 4 – ANOVA para o modelo referente ao processo de usinagem sem óleo

Com base nos modelos encontrados foi realizada uma estimativa para se verificar o tempo de vida útil do filtro, ou seja, quando a vazão do mesmo for menor do que 5 m³/min, conforme apresentado na Tabela 5.

Processo	Modelo	Tempo estimado até a saturação (semanas)
Torno sem óleo	Vazão = 28,527.e ^{-0,055.t}	31,5
Retífica	Vazão = 28,621.t ^{-0,504}	31,5

Tabela 5 – Resultados dos modelos analisados para cada processo

Verifica-se que, independente do processo avaliado, o tempo para a saturação do filtro foi o mesmo (aproximadamente 8 meses). Para fins práticos, a troca do filtro deve ser prevista para um tempo menos, muito provavelmente próximo do sétimo mês, a fim de evitar problemas operacionais nos processos.

5. Considerações finais

O presente artigo teve como objetivo estimar a vida útil do filtro de um equipamento industrial em dois cenários, utilizando modelos de degradação. Através das coletas, análises e modelagens dos dados de vazão do filtro foi possível estimar o tempo de vida útil, associado com a saturação do filtro. Esse tempo de vida do filtro até a ocorrência de falha pode ser utilizado como subsídio para a realização das atividades de manutenção preventiva, e assim, recuperar a funcionalidade do equipamento.

Além disso, para produtos novos ou em fase de desenvolvimento, a possibilidade de se obter estimativas de vida útil de um produto sem a necessidade de levar o mesmo até a falha representa um avanço considerável nos dias atuais, nos quais os prazos de desenvolvimento são cada vez mais reduzidos.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se fazer a análise de vida do filtro verificando outras variáveis além da vazão, como o peso do filtro ao longo do tempo (o quanto agrega partículas sólidas), a viscosidade e temperatura do óleo utilizado no processo de produção, o tipo de peça processada, entre outros. Também é possível fazer uma análise de quanto a saturação do filtro pode impactar em outros componentes, como o motor, rolamentos e rotor, além da realização de ensaios com reposição do componente (no caso da ocorrência de falha).

Referências

- ANZANELLO, M. J.; SILVA, P. R. S.; RIBEIRO, J. L. D.; FOGLIATTO, F. S. *Proposição de modelo de degradação para capacitores submetidos a ensaios acelerados*. In: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Ouro Preto. ABEPRO, 2003.
- DINIZ, N. *O impacto da janela de Hurst na previsão de séries temporais financeiras*. Dissertação (Mestrado em Economia). Faculdade de Administração, Economia e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011, 158p.

- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D.** *Confiabilidade e manutenção industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 265p.
- FREUND, J. E.; SIMON, G. A.** *Estatística aplicada*. 9a Ed. Porto Alegre: Bookman, 2000.
- GUJARATI, D. N.** *Econometria básica*. 3a Ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2005.
- GUMIERE, S. J.; MORAES, J. M.; VICTÓRIA, R. L.** Calibração e validação de um modelo solo-vegetação-atmosfera na floresta nacional de Tapajós, Pará. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 4, p. 25-35, 2006.
- HAMADA, M.; MEEKER, W.** *Statistical tools for the rapid development and evaluation of high-reliability products*. 1995. Disponível em: < <http://www.bisrg.uwaterloo.ca/archive/RR-95-02.pdf> >. Acesso em: 28 ago 2011.
- KRÜGER, E. L.; PAPST, A. L. G.** *Aferição de equações preditivas da temperatura ambiente quando aplicadas a uma série de dados mais recente*. In: VIII Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído. Curitiba. 2003. p.1409-1416.
- LAFFRAIA, J. R. B.** *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. 2a Edição. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- OLIVEIRA, R. V. P. B.** *Uma abordagem bayesiana para modelos de degradação: a obtenção da distribuição preditiva a posteriori dos tempos de falha de unidades amostrais futuras e sob teste*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFMG, Belo Horizonte, 2011, 146p.
- POHL, L.; RIBEIRO, J. L. D.; CALCAGNOTTO, J.; SILVA, M. H. M.** *Modelos de degradação aplicados à melhoria da confiabilidade de produtos*. In: XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Niterói. ABEPRO, 1998. p.1-8.
- SHINGO, S.** *O Sistema Toyota de produção sob o ponto de vista da Engenharia de Produção*. 2a Ed. Porto Alegre: Artmed, 1996. 296p.
- SILVA, R. R.; MATTOS, N. M. C.** *Análise bayesiana da confiabilidade de itens submetidos a testes de degradação*. In: XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador. 2001. p.1-8.
- VELASCO, L. H.** *Previsão de demanda de acessos móveis no sistema de telefonia brasileiro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 2008.
- VIANEI, R. D. M.** *Ensaio de degradação destrutivos: aplicação em tempo de vida de prateleira*. Dissertação (Mestrado em Estatística). Departamento de Estatística, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008, 51p.
- WUTTKE, R. A.; SELLITO, M. A.** Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Revista Produção Online*, v. 8, n. 4, p. 1-23, 2008.