



CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE E DA POSIÇÃO NA CURVA DA BANHEIRA DE UMA VÁLVULA DE PROCESSO PETROQUÍMICO

AVAILABILITY AND POSITION IN BATH-TUBE CURVE CALCULATION OF A PETROCHEMICAL PROCESS VALVE

Régis André Wuttke

Engenheiro Eletricista

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Engenharia Elétrica

Av. Unisinos 950, 93022-000, São Leopoldo, RS

51 3591-1166 regiswuttke@gmail.com

Miguel Afonso Sellitto

Doutor em Engenharia de Produção

Universidade do Vale do rio dos Sinos - UNISINOS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas - PPGEPS

Av. Unisinos 950, 93022-000, São Leopoldo, RS

51 3591-1166 sellitto@unisinos.br

RESUMO

O objetivo do artigo foi apresentar um método para calcular a disponibilidade e posicionar, ao longo de seu ciclo de vida, na curva da banheira, um sistema tecnológico complexo sujeito a desgaste e a intervenções incompletas de manutenção. O método de pesquisa foi o estudo de caso exploratório em planta petroquímica, aplicado em uma válvula de processo, um sistema complexo, composto por subsistemas que interagem e afetam o resultado. O método proposto é uma técnica quantitativa que pode servir como alternativa para etapas de um modelo estratégico já proposto para a gestão da manutenção industrial, a RCM. O artigo revisa conceitos e teoria da confiabilidade aplicada à manutenção de sistemas complexos industriais. Na pesquisa, foram levantados, no sistema de informações da empresa, os tempos entre falhas



e para reparo do sistema e modela distribuições para estes tempos. Com base nos resultados, foram calculadas as funções Confiabilidade $R(t)$ e Manutenibilidade $M(t)$ e, pela combinação de seus valores esperados, a disponibilidade, que ficou acima de 99%. Também foi calculada a função taxa de falhas $h(t)$. Como seu comportamento foi crescente, admitiu-se que o sistema está em fase de mortalidade senil. Pelo referencial teórico da RCM, a estratégia de manutenção indicada é a preventiva e a preparação para eventual reforma.

Palavras-chave: Disponibilidade, Confiabilidade, Manutenibilidade, Manutenção em indústria petroquímica, RCM.

ABSTRACT

This paper aims at present a method to calculate the availability and to identify, along the lifecycle, the position on the bath-tube curve of a complex technological system exposed to wear-out and incomplete maintenance actions. The research method was the exploratory case study in a petrochemical facility, applied to a process valve, a complex system, formed by subsystems that interact each other and influence throughput. The proposed method is a quantitative technique that can be useful as an alternative to some steps of a strategic model for maintenance management, RCM. We review concepts and theory of the reliability applied in complex industrial systems maintenance. We surveyed, in the plant information system, time between failures and time to repair, which were used in modeling probability distributions for them. We have calculated the functions Reliability $R(t)$ e Manutenibility $M(t)$. Combining theirs expected values, we calculated the availability, greater then 99%. We also calculated the failure rate $h(t)$. As it was crescent, we took for granted that the valve was in the wearout phase of life. By theoretical support granted by RCM, the maintenance strategy is preventive maintenance and eventually overhaul.

Key-words: Availability, Reliability, Maintenability, Maintenance in petrochemical industry, RCM.

1. INTRODUÇÃO

A exigência de clientes tem aumentado, exigindo novas tecnologias, modernização de equipamentos e automação de sistemas produtivos. Um desempenho eficaz dos novos processos produtivos depende de sistemas de produção mais complexos. A indisponibilidade de equipamentos e sistemas pode afetar a capacidade produtiva, aumentando custos e interferindo na qualidade do produto. Falhas podem acarretar comprometimentos significativos para a imagem institucional das empresas, principalmente se incluírem envolvidos aspectos de segurança pessoal e patrimonial e de meio ambiente. Neste novo contexto produtivo, tem crescido a importância estratégica da função manutenção industrial.



O interesse por técnicas de otimização da manutenção começou nos anos 1950, quando surgiram as primeiras estratégias baseadas em manutenção preventiva. Nos anos 1960, surgiram técnicas de pesquisa operacional como apoio às intervenções preventivas. Nos anos 1970, surgiu a CBM (*Condition Based Maintenance* – manutenção baseada em condições), a estratégia de preditiva, mais fortemente estabelecida nos anos 1980. Baseada em apoio computacional, a RCM (*Reliability Centred Maintenance* – manutenção centrada em confiabilidade), nos anos 1990 e 2000, migrou da indústria aeronáutica, onde nasceu, para outras indústrias, principalmente em fabricação e em particular, de produtos petroquímicos, foco deste artigo (MOUBRAY, 1998; CAMPBELL e REYES-PICKNEL, 2006). A RCM combina técnicas de gerenciamento de riscos e ferramentas de confiabilidade, tais como FMEA e FTA, com o objetivo de dar suporte a decisões estratégicas em manutenção. Uma das decorrências da adoção da RCM é o aumento na confiabilidade dos sistemas de produção e a redução das intervenções preventivas (BACKLUND e AKERSTEN, 2003).

Uma obra de referência em RCM é Moubray (1996). Rausand (1998) sintetiza o modelo clássico de abordagem da RCM. Na síntese, uma parte da abordagem é o modelo quantitativo de otimização da manutenção, baseado no comportamento da taxa de falha. O método apresentado neste artigo pode ser inserido no modelo quantitativo da RCM, oferecendo um complemento à taxa de falha, a disponibilidade A_v do sistema de produção. A RCM considera apenas a confiabilidade, a função que descreve o tempo até a falha, dado que ocorreu o reparo. O cálculo da disponibilidade inclui, além da confiabilidade, a manutenibilidade, a função que descreve o tempo até o reparo, dado que ocorreu a falha. Para aumentar a disponibilidade de um equipamento, é necessário, ao mesmo tempo, aumentar a confiabilidade, ou seja, a probabilidade do equipamento operar isento de falha até o tempo t , e a aumentar a manutenibilidade, ou seja, a probabilidade do equipamento ser reparado, em caso de falha, até o tempo t (SELLITTO, 2005).

O objetivo deste artigo foi apresentar e testar um método de cálculo da disponibilidade e localizar, no ciclo de vida e na curva da banheira, a posição de um sistema tecnológico complexo, sujeito a desgaste e a intervenções incompletas de manutenção. O método de pesquisa foi o estudo de caso exploratório. O método foi aplicado em uma planta petroquímica, em uma válvula de processo. Com base no ponto do ciclo de vida, foi possível formular uma conveniente estratégia de manutenção. O método de trabalho foi: (i) revisão bibliográfica dos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade aplicados à manutenção de equipamentos industriais; (ii) delimitar o sistema a ser estudado; (iii) levantamento histórico



de intervalos entre falhas e tempos até o reparo do equipamento em estudo; (iv) modelar, pela distribuição de Weibull, o intervalo entre falhas e, pelo fator de forma obtido, identificar o ponto no ciclo de vida em que o equipamento se encontra; (v) especificar as funções de confiabilidade e manutenibilidade e, pela combinação de seus valores esperados, calcular a disponibilidade do equipamento; e (vi) usar os resultados para discutir e propor uma política de manutenção para a válvula.

O método de pesquisa foi o estudo de caso exploratório. A principal técnica de pesquisa usada no estudo de caso foi a modelagem matemática. Segundo Eckstein (1975, *apud* ROESCH, 1999, p.87), um estudo de caso pode contribuir de cinco modos para uma teoria: oferecer uma descrição profunda e específica de um objeto; interpretar eventuais regularidades como evidências de postulados teóricos mais gerais, ainda não verificados; criar uma situação deliberadamente para testar uma idéia; fazer sondagens plausíveis acerca de uma teoria e o caso crucial, que apóia ou refuta a teoria. Entende-se que a contribuição do presente estudo de caso é do terceiro tipo: uma situação construída para o teste de uma idéia.

As conclusões devem se restringir ao caso estudado, até que, por repetição, possa-se chegar indutivamente a uma teoria fundamentada. A contribuição desta pesquisa é o relato em profundidade de um caso que, somado a outros, pode contribuir para a construção de uma teoria envolvendo estratégias de manutenção de válvulas petroquímicas. A delimitação é que foi desenvolvido no ambiente de uma indústria de produção de derivados de petróleo durante um período de vinte e oito meses. O restante do artigo está organizado em: (i) revisão bibliográfica; (ii) relato da pesquisa; (iii) discussão dos resultados; e (iv) continuidade.

2. TÉCNICAS QUANTITATIVAS EM MANUTENÇÃO

Técnicas quantitativas têm sido usadas como apoio a processos estratégicos em manutenção. Dentre muitas outras, citam-se algumas similares a que foi apresentada neste artigo, que foram apresentadas recentemente na literatura e foram úteis na pesquisa.

Bertling, Allan e Eriksson (2001) usaram a taxa de falha para especificar a estratégia de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica. Eisinger e Rakowsky (2001) inseriram incertezas em estudos de confiabilidade aplicados em manutenção, corrigindo falhas em estratégias causadas por abordagens determinísticas. Sellitto, Borchardt e Araújo (2002) modelaram os tempos entre falhas de equipamentos rodoviários e propuseram um método



para gerenciamento de risco em operações de transporte de passageiros. Pedregal, Garcia e Schmid (2004) integraram a RCM com a RCM2 (*remote condition monitoring*) em aplicações com instalações ferroviárias. Para Marquez e Gupta (2006), a RCM joga papel estratégico na manutenção industrial, pois pode ajudar a definir planos para garantir a confiabilidade do sistema de produção. Segundo os autores, na outra mão, a TPM joga papel no nível operacional, enfocando esforços no aumento da eficiência geral dos equipamentos, a OEE (*overall equipment effectiveness*). Zhang e Nakamura (2005) desenvolveram um método para programar atividades de manutenção baseado na evolução de parâmetros de confiabilidade, tais como a taxa de falhas de sistemas, e tendo como objetivo a redução dos custos de manutenção. Sellitto (2005) usou a modelagem de tempos entre falhas dos subsistemas de uma linha de montagem de componentes mecânicos para calcular a confiabilidade sistêmica da operação. Zhou, Xi e Lee (2007) integraram a RCM com técnicas de manutenção preditiva, adaptando-as a aplicando-as a sistemas complexos de produção sujeitos a degradação contínua. Quando a confiabilidade do sistema de produção, em movimento para baixo, atinge um patamar, um procedimento de manutenção preventiva é ativado. Kimura, Hata e Kobayashi (2007) construíram um sistema de informações para sustentar a aplicação da RCM na formulação da estratégia de manutenção de planta petroquímica.

Confiabilidade na gestão da manutenção: definições

O conceito de confiabilidade é empregado em vários campos de conhecimento, inclusive a gestão da manutenção. Confiabilidade é a probabilidade de um sistema exercer sem falhas a função para a qual foi projetado, por um determinado período de tempo e sob um conjunto de condições pré-estabelecidas. Sistema é definido de forma genérica e o conceito pode ser aplicado em diversos produtos, equipamentos, subsistemas, partes e componentes. Falha é definida como o evento ou o estado de inoperância de um sistema ou subsistema de produção que não executa a função para a qual foi especificado. Assim, pode-se também definir confiabilidade como a probabilidade do evento falha de um sistema produtivo não ocorrer antes do tempo t (RAUSAND e HOYLAND, 2004). Outra definição para falha é o fim da capacidade de um sistema em desempenhar uma função. Por sua vez, função pode ser definida como as ações desempenhadas e as características apresentadas por um componente, subsistema ou sistema produtivo (RAUSAND e OIEN, 1996).



A confiabilidade é descrita com o emprego de funções. Quatro funções apóiam a análise da confiabilidade: função confiabilidade $R(t)$, função probabilidade de falha $F(t)$, função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ e função taxa de falha $h(t)$. Dado um conjunto de condições operacionais, a função confiabilidade $R(t)$ de um componente ou sistema é a probabilidade que o sistema não venha a falhar (sobreviva) até o tempo t . A função probabilidade de falha $F(t)$ é o complemento de $R(t)$. A função densidade de probabilidade fdp ou pdf (*probability density function*) é a probabilidade que a falha venha a ocorrer no tempo entre t e $[t + \Delta t]$. A função taxa de falha $h(t)$ é a probabilidade condicional de que, dado que o item não falhou até t , falhará em $[t + \Delta t]$ (LAFRAIA, 2001).

Seja uma variável aleatória T , o tempo decorrido até o sistema falhar. A função de confiabilidade $R(t)$ é expressa por (1). Uma vez que um sistema não falha para $T \leq t$, ele necessariamente irá falhar para $T > t$. Tem-se então (2). Da definição de função de distribuição acumulada, tem-se (3). A função taxa de falhas, que também pode ser chamada de taxa de risco (*hazard rate*), pode ser obtida por (4). Finalmente, a confiabilidade pode ser expressa em função da taxa de risco por (5) (ERTAS e JONES, 1996).

$$R(t) = P[T > t] \quad (1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (3)$$

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4)$$

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t h(t) dt \right] \quad (5)$$

Curva da banheira, tipos de falhas e estratégias de manutenção

A análise do comportamento da taxa de falha de um equipamento ao longo do tempo pode ser representada por uma curva que possui a forma de uma banheira, a curva da banheira



(*bathhtub curve*), como na Figura 1. A curva representa as fases da vida características de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil. As fases estão associadas ao fator de forma γ , que é um dos parâmetros de uma eventual distribuição de Weibull que descreva a confiabilidade do item, como será apresentado mais adiante (SELLITTO, 2005).

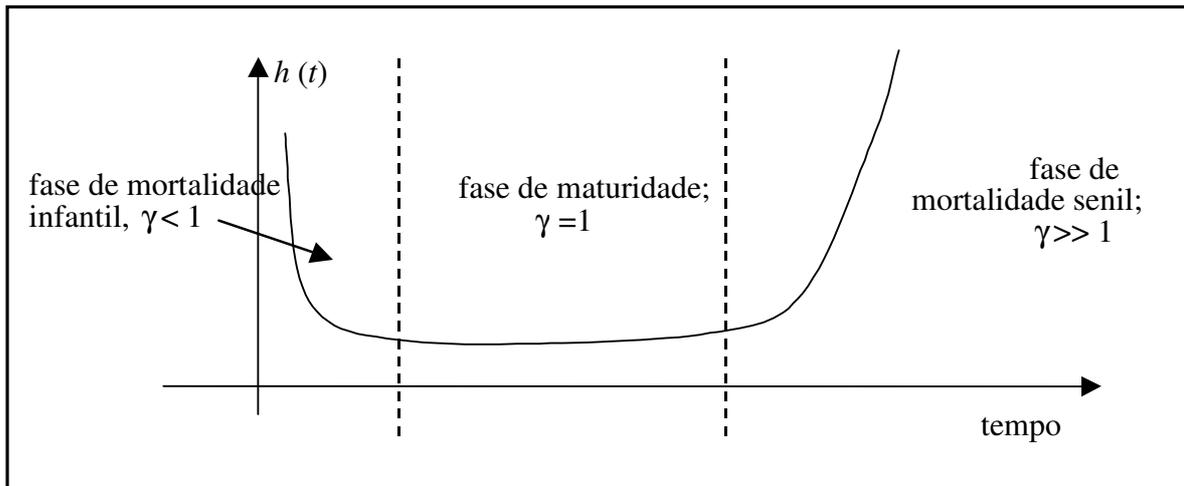


Figura 1 – Curva da Banheira e ciclo de vida de equipamentos

Fonte: Sellitto, 2005.

No período de mortalidade infantil, a taxa de falhas é alta, porém decrescente. As falhas preliminarmente são causadas por defeitos congênitos ou fraquezas, erros de projeto, peças defeituosas, processos de fabricação inadequados, mão-de-obra desqualificada, estocagem inadequada, instalação imprópria, partida deficiente entre outras. A taxa de falhas diminui com o tempo, conforme os reparos de defeitos eliminam componentes frágeis ou à medida que são detectados e reparados erros de projeto ou de instalação. Sellitto (2005) aponta que, neste período, a melhor estratégia de manutenção é a corretiva, ou seja, cabe à manutenção não apenas reparar o equipamento, mas corrigi-lo, para que a falha não se repita.

Entre t_1 e t_2 é a fase de maturidade ou período de vida útil. O valor médio da taxa de falha é constante. Nesta fase, as falhas ocorrem por causas aleatórias, externas ao sistema, tais como acidentes, liberações excessivas de energia, mau uso ou operação inadequada, e são de difícil controle. Falhas aleatórias podem assumir diversas naturezas, tais como: sobrecargas aleatórias, problemas externos de alimentação elétrica, vibração, impactos mecânicos, bruscas variações de temperatura, erros humanos de operação entre outros. Falhas aleatórias podem ser reduzidas projetando equipamentos mais robustos do que exige o meio em que opera ou



padronizando a operação. Sellitto (2005) aponta que, neste período, a melhor estratégia de manutenção é a preditiva, ou seja, monitoramento para detectar o início da fase de desgaste.

Após t_2 , há crescimento da taxa de falhas, a mortalidade senil, que representa o início do período final de vida do item. Esta fase é caracterizada pelo desgaste do componente, corrosão, fadiga, trincas, deterioração mecânica, elétrica ou química, manutenção insuficiente entre outros. Para produzir produtos com vida útil mais prolongada, deve-se atentar para o projeto, utilizando materiais e componentes mais duráveis, um plano de inspeção e manutenção que detecte que iniciou a mortalidade senil e a previna, por substituição preventiva de itens, e supressão dos agentes nocivos presentes no meio (LEWIS, 1994; IRESON, COOMBS E MOSS, 1996; DODSON E NOLAN, 2002; SELLITTO, 2005). Sellitto (2005) aponta que, neste período, a melhor estratégia de manutenção é a preventiva, ou seja, já que o equipamento irá falhar, cabe à manutenção aproveitar a melhor oportunidade para substituir ou reformar o item.

Sellitto (2005) destaca que o término da vida útil, sob o ponto de vista de confiabilidade, que ocorre quando o item ingressa no período de mortalidade senil, não deve ser confundido com sua obsolescência do ponto de vista mercadológico ou produtivo. Nesta, o item é substituído por haver desaparecido o valor atribuído à função que desempenha. Naquela, a substituição ocorre por queda na confiabilidade do item em produzir o valor que dele se espera. Siqueira (2005) distingue vida segura de vida econômica. Naquela, o item opera até que a probabilidade de falha ultrapasse um patamar de segurança. Nesta, o item opera enquanto a função que desempenha continua sendo necessária.

Siqueira (2005) diz que sistemas industriais evoluem na curva da banheira segundo várias características. Lafraia (2001) ressalta que pode não existir alguma fase, passando-se, por exemplo, da mortalidade infantil para a senil, diretamente. Este é o caso da pesquisa com embreagens, relatada em Sellitto, Borchardt e Araújo (2002). Sistemas eletrônicos geralmente apresentam mortalidade infantil e depois apenas falhas aleatórias, estacionando na parte baixa da curva. Tal região é dita sem memória de falha (*failure memoryless*), pois a incidência de uma falha no tempo t não tem correlação com o tempo até a próxima falha. Em software, as falhas de programação geralmente têm apenas mortalidade infantil, pois uma vez corrigidas, é impossível a reincidência, pois não se originam de processos dissipativos de energia.



Distribuições de probabilidade úteis em manutenção

Para estudos de confiabilidade em manutenção, é necessário determinar uma distribuição de probabilidade que se ajuste aos dados de tempo de vida do sistema. As de interesse para a manutenção são: normal, lognormal, Weibull, exponencial e gamma. A distribuição normal pode descrever tempos até falhas originadas de causas que se somam, como em britadores de martelos; a lognormal, quando a falha se origina de causas que se multiplicam, tal como em corrosão; a Weibull, quando várias causas competem e a primeira que ocorre causa a falha (sistemas série); a exponencial, quando a falha ocorre por motivos aleatórios; e a gamma, quando a última causa que ocorre dispara a falha (sistemas paralelos) (RAUSAND e HOYLAND, 2004; HAHN e SHAPIRO, 1967).

Para a normal, a função distribuição de probabilidade é dada por (6), em termos da média e do desvio padrão, na qual μ representa a medida central de uma tendência ou localização, como a média da população, σ indica a medida da dispersão, como o desvio padrão da população e t representa o tempo até a falha. Uma população que se ajuste à normal tem variações simétricas ao redor da média (DODSON e NOLAN, 2002),

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < t < \infty \quad (6)$$

Uma distribuição normal com $\ln t$ como variável independente reduz-se a uma distribuição lognormal. A sua função densidade de probabilidade é dada por (7), na qual t representa o tempo até a falha, com média do logaritmo dos dados μ e o desvio padrão do logaritmo dos dados σ .

$$f(t) = \frac{1}{\sigma.t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad t > 0 \quad (7)$$

Para Lafraia (2001), esta distribuição apresenta uma desvantagem que dificulta a sua aplicação referente à sua taxa de falha. Ela apresenta o valor zero quando o tempo t se aproxima de zero ou infinito, o que torna o ajuste difícil em alguns casos. Para valores de $\mu \gg \sigma$, a função lognormal aproxima-se da normal. É a que melhor descreve os tempos de vida



de componentes semicondutores cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas e degradação de contatos, sendo também adequada para mecanismos de falha por fadiga em materiais. Algumas aplicações da distribuição lognormal são falhas em rolamentos, motores e geradores, fadiga em metais, componentes do estado sólido (semicondutores, diodos e outros), isolantes elétricos e resistências elétricas (HAHN e SHAPIRO, 1967).

A distribuição de Weibull foi publicada por Waloddi Weibull em 1951 em estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais. A distribuição pode ser usada em pequenas amostras e tem flexibilidade, devido ao fator de forma β . A distribuição oferece informação para classificar tipos de falhas e suportar estratégias de manutenção (DODSON e NOLAN, 2002). Outra característica é a capacidade de modelar sistemas que operam em série: o primeiro dispositivo a falhar, o sistema falha, o que ocorre com muitos equipamentos industriais, tais como o estudado neste artigo (HAHN e SHAPIRO, 1967).

O parâmetro de forma surge na literatura sob vários símbolos (β , η ou γ). Neste artigo, usou-se γ . A função distribuição de probabilidade é dada por (8), na qual θ representa parâmetro de escala, γ representa parâmetro de forma e t representa o tempo até a falha. Um modelo alternativo inclui t_0 , um parâmetro de deslocamento, que faz com que a distribuição comece a atuar em um tempo $t > 0$. O significado físico deste deslocamento é que a probabilidade de uma falha antes de t_0 é zero (ELSAYED, 1996).

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma\right], \quad 0 \leq t \leq \infty \quad (8)$$

Alterando-se o parâmetro de forma, a função densidade de probabilidade de Weibull assume várias formas. Assim, esta distribuição pode ser utilizada em uma diversidade de situações e, dependendo do valor de γ , ela se torna igual ou muito semelhante a outras distribuições. Por exemplo (DODSON E NOLAN, 2002):

$\gamma = 1$, a distribuição de Weibull é idêntica a distribuição Exponencial;

$\gamma = 2$, a distribuição de Weibull é idêntica a distribuição Rayleigh;

$\gamma = 2,5$, a distribuição de Weibull aproxima-se da distribuição Lognormal; e

$\gamma = 3,6$, a distribuição de Weibull aproxima-se da distribuição Normal.



A Tabela 1 fornece interpretações físicas dos parâmetros da distribuição de Weibull.

Tabela 1 – Interpretações físicas dos parâmetros da distribuição de Weibull

| t_0 | γ | Significado |
|-------|---------------|---|
| = 0 | | Não há confiabilidade intrínseca. Significa que em $t = 0$ a probabilidade de falha é 0. |
| | <1 | Taxa de falhas decrescente, possivelmente devida a baixos coeficientes de segurança na carga. |
| | =1 | Taxa de falha constantes, falhas de origem aleatórias. |
| | >1 | Taxa de falhas crescente, desgaste iniciando logo que o componente entra em serviço. |
| > 0 | | Há período de garantia, durante o qual não ocorre falha. O componente possui confiabilidade intrínseca. |
| | <1 | Desgaste do tipo fadiga ou similar |
| | $\approx 0,5$ | Fadiga de baixo ciclo |
| | $\approx 0,8$ | Fadiga de alto ciclo |
| | >1 | Desgaste do tipo erosão |
| < 0 | | Há vida de prateleira, o componente pode falhar antes de ser usado. |
| | <1 | Desgaste do tipo fadiga, iniciado antes do componente entrar em serviço. |
| | >1 | Desgaste devido a contínua redução da resistência |

Fonte: LAFRAIA, 2001.

A distribuição exponencial descreve sistemas com taxas de falhas constantes. Substituindo a taxa de falha $\lambda(t)$ pela constante λ , a função distribuição de probabilidade (*fdp*) é dada por (9) (LEWIS, 1994), na qual λ representa a taxa de falha e t indica o tempo até a falha. A distribuição exponencial geralmente é aplicada em sistemas complexos não redundantes ou sistemas complexos com taxas de falhas independentes. Também pode ser aplicada em sistemas com dados de falhas mostrando causas muito heterogêneas, sistemas de vários componentes ou ainda sistemas de vários componentes com substituições antes de falhas devido à manutenção preventiva.

$$f(t) = \lambda.e^{-\lambda t} \quad (9)$$

A distribuição gamma descreve sistemas que operam com dispositivos em paralelo: a falha ocorre quando o último dispositivo falha. Exemplos são casas de compressores, nas quais há mais de um para a mesma tarefa, ou turbinas de avião, nas quais basta uma para que a aeronave opere. A expressão para a *fdp* da distribuição é dada em (10), na qual θ é o parâmetro de escala, γ é de forma, Γ é a função gamma e t indica o tempo até a falha. A



distribuição gamma é aplicada em processos produtivos que ocorrem em paralelo e que a última tarefa determina o fim da atividade, tal como em reformas de equipamentos de grande porte (HAHN e SHAPIRO, 1967).

$$f(t) = \frac{t^{-\lambda-1}}{\theta^\lambda \Gamma(\lambda)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (10)$$

3. MANUTENIBILIDADE E DISPONIBILIDADE

Enquanto a confiabilidade tenta reduzir a frequência ou severidade de falhas em sistemas, a manutenibilidade (ou mantenabilidade) concentra-se em diminuir o tempo da duração de falhas em um sistema e reestabelecer o funcionamento no menor tempo possível. As origens da manutenibilidade como disciplina da engenharia remonta aos anos 1950 e desde então, tem se tornado um objetivo da indústria (IRESON, COOMBS e MOSS, 1996).

A Norma Brasileira Registrada NBR 5462 (1994), que trata da terminologia para a confiabilidade, define manutenibilidade como: “Facilidade de um item em ser mantido ou recolocado no estado no qual pode executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios descritos”. A manutenibilidade também é considerada uma característica de projeto e instalação de um item, que é expresso pela probabilidade de que o tempo de manutenção não ultrapassará um determinado valor, quando o item é operado e mantido por pessoas e procedimentos prescritos.

A manutenibilidade tem por finalidade indicar em que tempo médio a equipe de manutenção terá sucesso no reparo. É um indicativo de performance, porém não é isolado. Seja T o tempo necessário para reparar um sistema a partir do instante da falha. T não é constante, mas uma variável randômica. A função de densidade de probabilidade de reparo $m(t)$ pode ser definida por (11), na qual $m(t)$ é a probabilidade que o reparo precise de um tempo entre t e $[t + \Delta t]$. A função distribuição para reparo $M(t)$ é dada por (12). O tempo médio para reparo ($MTTR$) é dado por (13) (LEWIS, 1994).

$$m(t) \cdot \Delta t = P[t \leq T \leq t + \Delta t] \quad (11)$$



$$M(t) = \int_0^t m(t) \cdot dt \quad (12)$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) \cdot dt \quad (13)$$

Os fatores aleatórios devem ser considerados na determinação do *MTTR* e da *m(t)* incluem desde a capacidade para diagnosticar a causa da falha até a disponibilidade de equipamento e pessoal habilitado para os procedimentos de reparo.

Tempos médios entre falhas (*MTBF*) para itens reparáveis e tempos médios até o reparo (*MTTR*) são medidas referenciais para a gestão da manutenção. Podem ser obtidas para um dado intervalo de tempo e em condições específicas de operação, mas a extrapolação requer distribuições de probabilidades. Dado que se tenha um conjunto finito de tempos até a falha e até o reparo, o *MTBF* (*Mean Time Between Failure*) e o *MTTR* (*Mean Time To Repair*) são, respectivamente, as médias aritméticas destes tempos. O *MTBF* é similar ao *MTTF* (*Mean Time To Failure*), aplicável a componentes não reparáveis, cuja vida termina na primeira falha. O *MTBF* é representado matematicamente pelas equações 14 e 15 (Lafraia, 2001), nas quais *TBF* indica o tempo entre falhas, *TTR* indica o tempo para reparo e *N* o número de ciclos.

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^N TBF_i}{N} \quad (14)$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N TTR_i}{N} \quad (15)$$

Sellitto (2005) observa que estas expressões valem para um conjunto finito de observações. Caso se deseje extrapolar ao tempo da amostra, é necessário determinar a distribuição de máxima verossimilhança que descreve o fenômeno e aplicar a equação (13), que gera expressões para o valor esperado, obtendo uma estimativa mais acurada para *MTBF* e *MTTR*. Neste artigo, foi usado software que usa os modelos canônicos das distribuições.

Segundo a NBR-5462 (1994), a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de



tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. De acordo com Ireson, Coombs e Moss (1996), a disponibilidade $A(t)$ representa a probabilidade de que um determinado sistema ou equipamento, quando usado em determinadas condições, esteja em condição operacional em um instante de tempo t . Na prática, disponibilidade é expressa pelo percentual de tempo em que o sistema encontra-se operante, para componentes que operem continuamente.

Dado que se tenham o $MTBF$ e o $MTTR$, é possível calcular a disponibilidade de um equipamento por (16). A disponibilidade indica a probabilidade de que o equipamento esteja disponível para a produção (RAUSAND e HOYLAND, 2004).

$$A_v(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (16)$$

4. A PESQUISA

O objetivo de pesquisa foi calcular a disponibilidade de uma válvula de processo petroquímico e localizar sua evolução de ciclo de vida na curva da banheira. A válvula é um equipamento tecnológico composto por sub-sistemas, cujos modos de falha competem entre si pela falha geral: o primeiro componente ou sub-sistema que falhar causa a falha sistêmica. Esta estrutura de falha remete à distribuição de Weibull. Os subsistemas que compõem a válvula são o castelo, o acionamento, a motorização, a vedação e a instrumentação de controle realimentado. A função é controlar, em malha realimentada, a vazão de um produto petroquímico, com características agressivas aos materiais e ao meio-ambiente.

O método de pesquisa foi o estudo de caso. O método de trabalho foi: levantamento de dados históricos de tempos até a falha e tempos para reparo; modelagem pelo software modelador Proconf 2000; obtenção dos parâmetros da distribuição de Weibull para os tempos até a falha e a distribuição e parâmetros para os tempos para reparo; e discussão dos resultados à luz dos objetivos de pesquisa. Foram coletados, do sistema de informação da empresa, dados de manutenção no intervalo de vinte e oito meses. Para cada ocorrência de manutenção, há um registro, de onde provém os dados para a obtenção do $MTBF$ e $MTTR$. Os dados surgem na Tabela 2.



Tabela 2 – Tempo entre falhas e tempo até o reparo, em horas

| Tempo para reparo (horas) | | | | Tempo entre falhas (horas) | | | |
|---------------------------|------|------|------|----------------------------|--------|--------|---------|
| 2,00 | 2,50 | 3,00 | 4,00 | 286,0 | 303,5 | 405,5 | 449,0 |
| 4,00 | 5,00 | 5,50 | 6,00 | 472,5 | 496,25 | 714,5 | 739,0 |
| 6,50 | 7,00 | 7,50 | 7,50 | 784,0 | 884,00 | 975,0 | 1029,0 |
| 7,75 | 8,00 | 8,00 | 8,50 | 1097,5 | 1168,5 | 1316,0 | 1935,25 |
| 8,75 | 9,00 | | | 2080,0 | 2130,0 | | |

Fonte: sistema de informação da empresa

O ProConf 2000 testa por máxima verossimilhança, pelos testes do qui-quadrado e KS, ajustes às distribuições Weibull, exponencial, normal, lognormal e gamma. O software oferece os papéis de probabilidade e aponta que distribuições não podem ser rejeitadas, cabendo ao pesquisador indicar qual delas será adotada, segundo uma teoria cabível ao caso. Também é usado para estimar os parâmetros das distribuições de probabilidade, determinar a função densidade de falha ($f(t)$), o tempo médio de falha ($MTTF$) e a função de confiabilidade ($R(t)$). Obras acadêmicas referenciam o Proconf, em monografias, dissertações, teses e artigos.

Análise do tempo para reparo

Foram testadas as curvas para a distribuição normal, lognormal, Weibull e exponencial. Pela análise visual dos gráficos de papel de probabilidade, observa-se que a distribuição lognormal, representada pela Figura. 2, pode explicar os dados, o que está de acordo com a teoria exposta em Sellitto (2005) e Lafraia (2001), segundo a qual, reparos em equipamentos industriais são atividades com componente intelectual e cognitivo e podem seguir as características desta distribuição. Segundo Sellitto (2005), em tempos para reparo, também é possível encontrar a distribuição normal, quando o reparo for uma soma de tarefas independentes e seqüenciais, tal como ocorre em reformas de máquinas e em procedimentos preventivos mais complexos e intrincados. Técnicas de gerenciamento de atividades, tais como o método PERT-CPM, consideram a distribuição normal para o tempo total resultante de somas de tempos de atividades parciais.

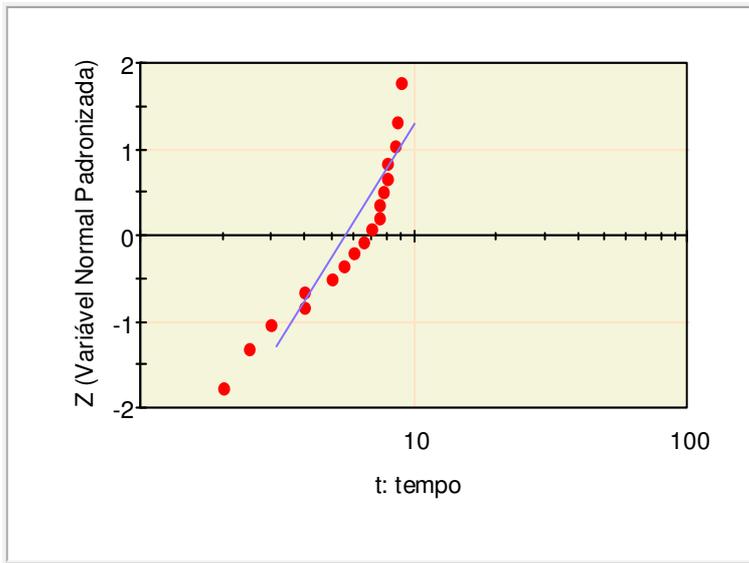


Figura 2 – Papel de probabilidade lognormal para o tempo para reparo

Os resultados dos ajustes do ProConf 2000 surgem na Tabela 3. Usou-se a lognormal. O tempo médio para reparo é de 6,2267 horas. Com 95% do intervalo de confiança, o tempo médio entre falhas assume valores entre 4,962 e 7,9048 horas. A significância do ajuste é 0,1. A Figura 3 apresenta a função manutenibilidade.

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste do tempo até o reparo

| | t_{10} | t_{50} | $MTTR$ |
|-------------|----------|----------|-----------|
| Weibull | 3,2468 | 6,033 | 6,0811 |
| Lognormal | 3,1951 | 5,6429 | 6,2267 |
| Normal | 3,2957 | 6,1477 | 6,1389 |
| Exponencial | 0,6468 | 4,2552 | REJEITADA |

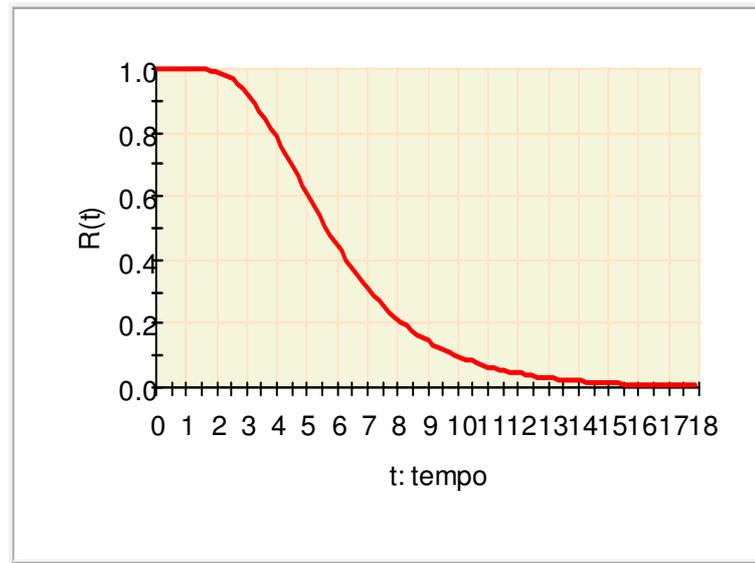


Figura 3 – Função $M(t)$, manutenibilidade

Análise do tempo entre falhas

De modo análogo, foram testadas distribuições para o tempo entre falhas. O papel de probabilidade para o modelo Weibull da Figura 4 parece descrever bem os dados, como era de se esperar. Pela teoria exposta em Sellitto (2005), Rausand e Hoyland (2004) e Lewis (1994), tempos entre falhas em equipamentos industriais complexos, com número de modos de falha que tendem a infinito e competem ao causar a falha geral, seguem esta distribuição. O resultado dos ajustes surge na Tabela 4. A função confiabilidade da válvula surge na Figura 5. O histograma para a taxa de falhas surge na Figura 6.

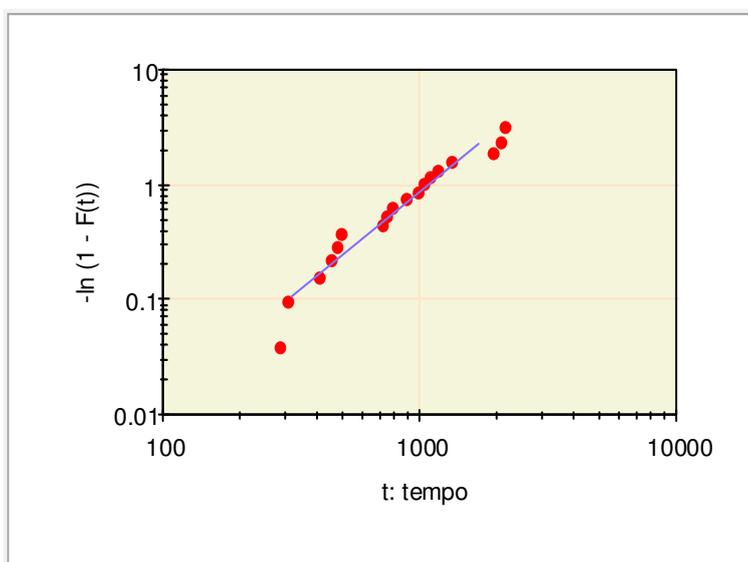


Figura 4 – Papel de probabilidade Weibull para tempos entre falhas



Tabela 4 – Parâmetros de ajuste do tempo entre falhas

| | t_{10} | t_{50} | MTBF |
|-------------|----------|----------|-----------|
| Weibull | 275,4125 | 853,8599 | 950,8851 |
| LogNormal | 370,5528 | 803,9546 | 965,0032 |
| Normal | 341,3671 | 996,2212 | 959,1944 |
| Exponencial | 101,0612 | 664,8629 | REJEITADA |

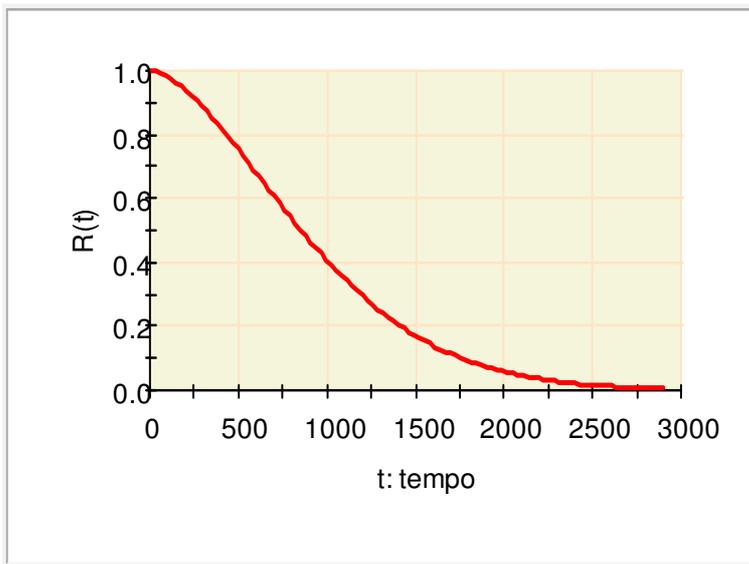


Figura 6 - Função $R(t)$, confiabilidade

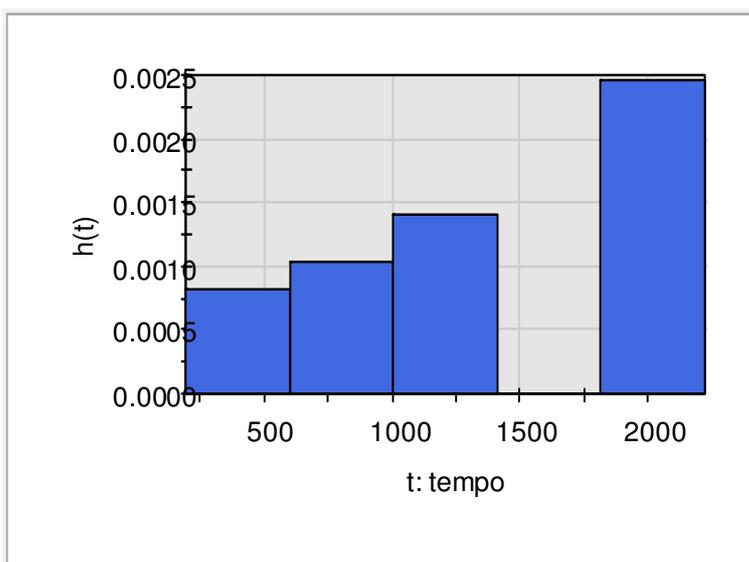


Figura 7 – Taxa de falha para tempo entre falhas



Utilizando (17), obtém-se a disponibilidade do dispositivo estudado. Pode-se então dizer que em 99,35% do tempo, o equipamento esteve disponível para a operação.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{950,8851}{950,8851 + 6,2267} = 99,35\% \quad (17)$$

Quanto ao valor da disponibilidade, observa-se que este depende da estratégia de manutenção, pois esta afeta o intervalo entre falhas, pela quantidade de preventivas realizadas, e o tempo até o reparo, pelos recursos humanos, ferramentais e peças-reserva. Portanto, não se pode generalizar o resultado obtido. O máximo que se pode esperar, por repetição de casos, é o aperfeiçoamento do método, sempre que novas aplicações aportem peculiaridades que devem ser incluídas na teoria e na prática dos procedimentos.

Quanto ao fator de forma, como este é igual a 1,8045, a taxa de falhas é crescente e indica que a fase do ciclo de vida em que a válvula se encontra é a mortalidade senil. O intervalo de confiança a 95% para o fator de forma vai de 1,0266 a 2,2115. O tempo médio entre falhas indicado pela distribuição de Weibull é de 950,8851 horas. A significância do ajuste é 0,22. O histograma reforça que a taxa de falhas é crescente e o equipamento está em mortalidade senil. Na Figura 8, aponta-se a mais provável posição atual do equipamento.

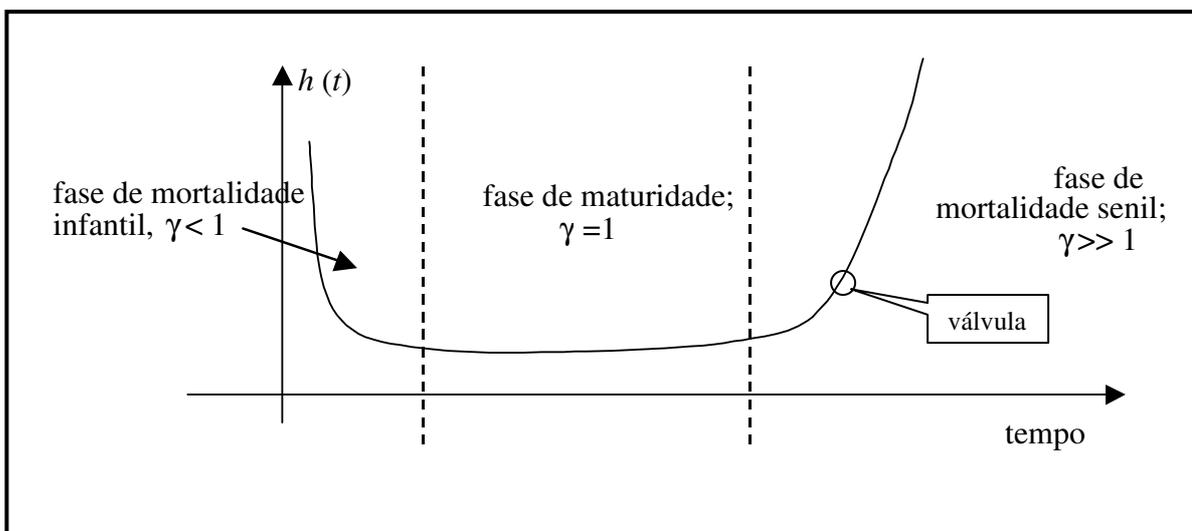


Figura 8 – Posição do equipamento em seu ciclo de vida

Segundo o exposto em Sellitto (2005), para a válvula, a melhor estratégia de manutenção é a preventiva. Por levantamento do histórico de falhas, as incidências mais observadas estiveram relacionadas a desgaste, deterioração mecânica ou



química, envelhecimento, abrasão e corrosão. Um plano de manutenção incluiria a identificação dos itens frágeis no equipamento, escolha de ao menos uma variável de controle para cada item que pudesse apreender o seu desgaste, monitoração das variáveis e, por modelos matemáticos como os disponíveis em Siqueira (2005), definir o momento indicado para a troca ou reforma do item. Outra alternativa é usar o modelo detalhado em Monchy (1989) e exemplificado em Sellitto, Borchardt e Araújo (2002) para calcular, independentemente de medições, o intervalo entre intervenções que minimiza o custo de manutenção do item. Também seria útil listar peças que valeriam a pena ser mantidas em estoque, já que, como o equipamento está em mortalidade senil, é certo que quebrariam, só não se sabe quando. Por cálculo de probabilidades e com uso da distribuição de Poisson e modelos de filas expostos em Leemis (1995), é possível especificar as quantidades que seriam armazenadas para um dado nível de confiança.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste artigo foi apresentar e testar um método para o cálculo da disponibilidade e a localização, na curva da banheira, de um sistema tecnológico sujeito a desgaste e a intervenções incompletas de manutenção. O método foi testado em uma planta petroquímica, em uma válvula de controle de processo. Como o processo completo engloba mais equipamentos, para obter-se a confiabilidade da planta produtiva seria necessária a análise dos demais equipamentos e a construção do RBD (*Reliability Block Diagram* – diagrama de blocos de confiabilidade). O método de pesquisa foi o estudo de caso exploratório: foi a primeira aplicação do método em válvula petroquímica.

Foram levantados, com o apoio do sistema de informações da empresa, dados de tempos entre falhas e para reparo. Foi importante para o estudo que as informações coletadas fossem confiáveis. Assim, para trabalhos em confiabilidade e modelagem de falhas, é importante a existência de bancos de dados consistente, independentemente do *software* ou ferramenta utilizada para a gestão da manutenção.

O valor de disponibilidade a que se chegou é afetado pela estratégia de manutenção da empresa e não pode ser generalizado para outras válvulas ou outras plantas petroquímicas. A taxa de falhas calculada foi crescente. Se a atual estratégia de manutenção for mantida, é lícito esperar que a disponibilidade e a confiabilidade diminuam com o passar do tempo. A



generalização que se pode esperar é metodológica: refinamento e robustecimento do método por repetição indutiva de casos.

O estudo foi importante para a empresa, pois existe, na planta produtiva, uma grande quantidade deste tipo de equipamento. A existência de um método para o cálculo de disponibilidade e a indicação de uma estratégia de manutenção para válvulas, com base no comportamento da taxa de falha, pode ser útil para a gestão da competitividade da empresa pela gestão da manutenção. A disponibilidade pode ser um indicador que realmente ações de manutenção: quanto maior o *MTBF* e menor o *MTTR*, maior a disponibilidade dos equipamentos críticos, maiores os lotes e menores os custos unitários de produção. Nos produtos em que a competição no mercado petroquímico for por preço, aumenta a competitividade.

Para possível continuidade de pesquisa, pode-se sugerir a análise de confiabilidade das demais etapas do processo produtivo, chegando a uma análise completa de confiabilidade da planta petroquímica, utilizando, por exemplo, a teoria de confiabilidade de sistemas, apresentada em Rausand e Hoyland (2004). Outra sugestão seria, a partir dos dados coletados e dos resultados obtidos, elaborar um plano de manutenção preventiva e de reformas específico para válvulas de controle. Finalmente, sugere-se levantar uma curva relacionando a disponibilidade de válvulas com a redução do custo de produção de petroquímicos, chegando, eventualmente, a uma disponibilidade ótima, que minimize a soma do custo de produção com o custo da manutenção requerida para a disponibilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5462. Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BACKLUND, F.; AKERSTEN, P. RCM introduction: process and requirements management aspects. **Journal of Quality in Maintenance Management**, v.9, n.3, p.250-264, 2003.

BERTLING, L.; ALLAN, R.; ERIKSSON, R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.20, n.1, p.75- 82, 2005.

CAMPBELL, J.; REYES-PICKNEL, J. **Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management** Productivity Press, Cambridge, MA, 2006.

DODSON, B.; NOLAN, D. **Reliability engineering handbook**. N. York: Marcel Dekker, 2002.



EISINGER, S.; RAKOWSKY, U. Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance — a probabilistic approach. **Reliability Engineering & System Safety**, v.71, n.2, p.159-164, 2001.

ELSAYED, E. **System reliability engineering**. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996

ERTAS, A.; JONES, J. **The Engineering Design Process**. N. York: John Wiley & Sons, 1996.

HAHN, G.; SHAPIRO, S. **Statistical models in engineering**. N. York: John Wiley & Sons, 1967.

IRESON, W.; COOMBS, C.; MOSS, R. **Handbook of Reliability Engineering and Management**. N. York: McGraw-Hill, 1996.

LAFRAIA, J. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEWIS, E. **Introduction to Reliability Engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

LEEMIS, L. **Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods**. New Jersey: Prentice-Hall, 1995.

KIMURA, F.; HATA, T.; KOBAYASHI, N. Reliability-Centered Maintenance Planning based on Computer-Aided FMEA. **Anais do 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems**, Seul, 2002, disponível em <http://www.fmeainfocentre.com/papers/cirp-ms-02.pdf>, acesso em maio de 2008.

MARQUEZ, A.; GUPTA, J. Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars. **Omega**, v.34, n.3, p.313-326, 2006.

MONCHY, F. **A função manutenção**. S. Paulo: Durban. 1989,

MOUBRAY, J. Reliability centred-maintenance. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.

PEDREGAL, D.; GARCIA, F.; SCHMID, F. RCM2 predictive maintenance of railway systems based on unobserved components models. **Reliability Engineering & System Safety**, v.83,n.1, p.103-110, 2004.

PROCONF2000. Confiabilidade de componentes. **Software**. Copyright©, Maxxi Gestão Empresarial, Porto Alegre, 2000.

RAUSAND, M.; OIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering and Safety Systems**, v.58, n.1, p.73-83, 1996.

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering and Safety Systems**, v.60, n.2, p.121-132, 1998.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods and applications**. N. York: Wiley, 2004.



ROESCH, S. **Projetos de estágio e de pesquisa em administração**: guia para estágios, trabalhos de conclusão, dissertações e estudos de caso. São Paulo: Atlas, 1999.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Produção**, v.15, n.1, p.44-59, 2005.

SELLITTO, M.; BORCHADT, M.; ARAÚJO, D. Manutenção centrada em confiabilidade: uma abordagem quantitativa. **Anais do XXII ENEGEP**. Curitiba: ABEPRO. 2002.

SIQUEIRA, I. **Manutenção centrada em confiabilidade**. R. Janeiro: Qualitymark, 2005.

ZHANG, T.; NAKAMURA, M. Reliability-based optimal maintenance scheduling by considering maintenance effect to reduce cost. **Quality and Reliability Engineering International**, v.21, n.2, p.203-220, 2005.

ZHOU, X.; XI, L.; LEE, J. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. **Reliability Engineering & System Safety**, v.92, n.4, p.530-534, 2007.

Artigo recebido em 2007 e aprovado para publicação em 2008