

OTIMIZAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE INSPEÇÕES EM PSV USANDO ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS

FREQUENCY OF PSV INSPECTION OPTMIZATION USING STATISTICAL DATA ANALYSIS

Alexandre Guimarães Botelho* E-mail: ag.botelho@hotmail.com

* PETROBRAS

Resumo: O presente trabalho demonstra como a aplicação de métodos analíticos qualitativos pode ser apoiada pela análise estatística de dados de falha de equipamentos para a determinação de uma política adequada e custo-eficiente de manutenção, de forma a reduzir o custo do ciclo de vida do equipamento. Para tal, um estudo de caso foi realizado com dados de falha e manutenção de uma amostra de válvulas de segurança e alívio (PSV) de uma unidade de produção de óleo e gás da PETROBRAS. Os dados foram classificados conforme modos de falha identificados usando uma análise de modos de falha e efeitos—FMEA, e ajustados mediante o uso da distribuição de weibull. Os resultados demonstram a possibilidade de redução de frequência de manutenção, representando 29% de redução de eventos, sem aumento do risco, além de indicar as falhas potenciais a serem bloqueadas pelo plano de inspeção.

Palavras-chave: Inspeção. PSV. Análise estatística de dados. FMEA. Weibull.

Abstract: The present paper shows how qualitative analytical methodologies can be enhanced by statistical failure data analysis of process equipment in order to select an appropriate and cost-effective maintenance policy to reduce equipment life cycle cost. As such, a case study was carried out with failure and maintenance data from a sample of pressure safety valves (PSV) of a PETROBRAS's oil and gas production unit. Data was classified according to a failure mode and effect analysis— FMEA, and adjusted using a weibull distribution. The results show the possibility of reduction of maintenance frequency representing 29% of event reduction, without increasing risk, as well as evidencing the potential failures which must be blocked by the inspection plan.

Keywords: Inspection. PSV. Statistical data analysis. FMEA. Weibull.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O custo da manutenção

Smith (1988) define que falha é uma não-conformidade com algum critério de desempenho definido. Portanto, qualquer desvio no desempenho requerido de um

equipamento precisa ser corrigido pela manutenção. A falha pode ocorrer devido a erros no projeto ou fabricação, que tornem o equipamento suscetível; por degradação funcional, devido à exposição prolongada às condições operacionais; ou de forma aleatória, quando um evento inesperado submete o equipamento a uma condição para a qual não têm resistência.

Segundo Dekker (1996, apud ETI, 2006) Em plantas de processo complexas os setores de operação e manutenção podem representar até 30% do total de funcionários. Portanto, é comum em diversas organizações, que a manutenção seja vista como “um centro de custo ou mal necessário” (AL-NAJJAR, 2006). As razões para esta visão ultrapassada da manutenção podem ser localizadas nos primórdios da indústria, quando os equipamentos eram projetados para durar muito mais que o necessário. Desta forma, a manutenção existia apenas quando o equipamento falhava, o que ocorria, normalmente, após longo período de operação.

1.2 Manutenção preventiva

Com o advento da Segunda Guerra, a necessidade de produtos para alimentar as frentes de batalha, aliada à escassez da mão-de-obra, levou ao aumento da mecanização da produção, bem como ao desenvolvimento de projetos melhor dimensionados para o tempo de uso a que se pretendia.

Começa a evidenciar-se a necessidade de maior disponibilidade, bem como maior confiabilidade, tudo isto na busca da maior produtividade; a indústria estava bastante dependente do bom funcionamento das máquinas. Isto levou à idéia de que falhas [sic] dos equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, o que resultou no conceito de manutenção preventiva. (PINTO; XAVIER, 2001, p. 4)

A manutenção preventiva é definida na ISO-14224 como a manutenção levada a cabo em intervalos pré-determinados, conforme um critério definido para reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item. Em sistemas de produção contínua, a manutenção, seja preventiva, seja para corrigir a falha, obriga a parada de produção. Entretanto, estudos mostram que o custo da manutenção corretiva é, normalmente, duas vezes maior que o da preventiva (PINTO; XAVIER, 2001). Isto é decorrente do fato de que uma falha costuma levar à

danificação de outros componentes do equipamento, resultando em maiores custos com sobressalentes e tempo improdutivo.

1.3 Manutenção preditiva

Com o aumento da complexidade dos equipamentos diversas técnicas de manutenção não intrusiva, e de monitoração da condição surgiram para complementar a manutenção preventiva. As técnicas preditivas partem do princípio que a maioria das falhas possui uma lei de propagação que pode ser definida mediante o acompanhamento da tendência de variáveis de desempenho do equipamento, até um valor limite que aciona a manutenção preventiva.

1.4O papel atual da manutenção

Um sistema total de qualidade, inclui o conceito de qualidade e de custo em todo o ciclo de vida do produto.

De modo ideal, um sistema de controle total da qualidade, em que todas as atividades interajam para a produção de produtos com desvios mínimos dos valores nominais, vai minimizar custos da qualidade e empregar da maneira mais econômica todos os recursos da empresa. (TAGUCHI, 1990, p. 4)

Sendo assim, é natural que a manutenção, enquanto parte integrada ao processo produtivo, siga os mesmos princípios que norteiam o sistema de qualidade da empresa. De fato, a adoção das premissas de melhoria contínua e a mudança para uma estratégia pró-ativa de identificação de possíveis falhas antes de sua ocorrência é o que define a “manutenção de classe mundial” (Moblely, 2002); portanto, podemos sumarizar, neste estudo, a missão da manutenção como a de maximizar a disponibilidade dos ativos industriais minimizando seu custo do ciclo de vida.

1.5 Válvulas de segurança e alívio - PSV

Válvulas de segurança e alívio são definidas como:

Um dispositivo de alívio de pressão projetado para ‘abrir e aliviar pressão excessiva e para fechar novamente prevenindo a continuação da vazão de fluido após as condições normais terem sido re-estabelecidas. (AMERICAN PETROIL INSTITUTE, 2000, p. 1. tradução nossa).

O exemplo mais simples de um dispositivo semelhante seria a válvula de uma panela de pressão. PSV, entretanto, são equipamentos mais sofisticados. Sua construção mais simples consiste num disco metálico liso apoiado sobre uma sede anular metálica lisa. Sobre o disco atua uma haste e, em torno desta, uma mola, cujo objetivo é manter o disco pressionado contra a sede com uma força determinada. A face central do disco fica em contato com o fluido contido no equipamento e submetido a uma força decorrente da pressão e da área exposta. Quando a pressão do fluido atinge o valor de referência, a força vertical supera a da mola, pressionando-a. Neste momento, o fluido passa entre o disco e a sede. Esta passagem expõe a superfície do disco coberta pela sede, o aumento na área promove aumento da força do fluido, que leva ao “pop”, ou abertura da válvula; o fluido preenche a cavidade do corpo e é descartado pelo bocal. Quando um determinado volume de fluido é removido, a pressão no vaso diminui e a mola volta a empurrar o disco contra a sede, vedando-a.

1.6 Limites para políticas de manutenção de PSV

A regulamentação para vasos de pressão e caldeiras do Ministério do Trabalho (NR-13) estabelece prazos máximos de inspeção para vasos de pressão conforme sua categorização de risco. A limitação legal do prazo máximo de inspeção depende da categoria do vaso e também da condição de certificação da empresa como possuindo um “serviço próprio de inspeção de equipamentos”, conforme previsto na legislação, e definido na portaria no. 16, do Inmetro (2001). Além disso, é definido que:

As válvulas de segurança dos vasos de pressão devem ser desmontadas, inspecionadas e re-calibradas por ocasião do exame interno periódico. (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2004, p. 106)

A norma Petrobras N-2368 - Inspeção de válvulas de segurança e alívio, revisão D, classifica as PSV por níveis de criticidade, onde prazos ainda mais restritos são definidos como prazos máximos.

Figura 1 - Quadro informando os prazos máximos conforme nível de criticidade de psv

Nível de Criticidade	Descrição	Prazo Máximo de Inspeção Recomendado
A	Válvulas que podem sofrer incrustação, colagem, entupimento, corrosão agressiva que possam interferir na sua atuação normal, ou que necessitem freqüentemente de manutenção corretiva.	1 ano
B	Válvulas sujeitas a reduzido desgaste por parte do fluido.	2 anos
C	Válvulas que mantenham contato com fluidos "limpos", que não apresentem risco de colagem, entupimento ou desgaste dos materiais em contato com o fluido.	4 anos
D	Válvulas em que se comprove através de confiável histórico de recepção e manutenção que podem atender em um prazo maior que o indicado para o nível de criticidade C.	6 anos

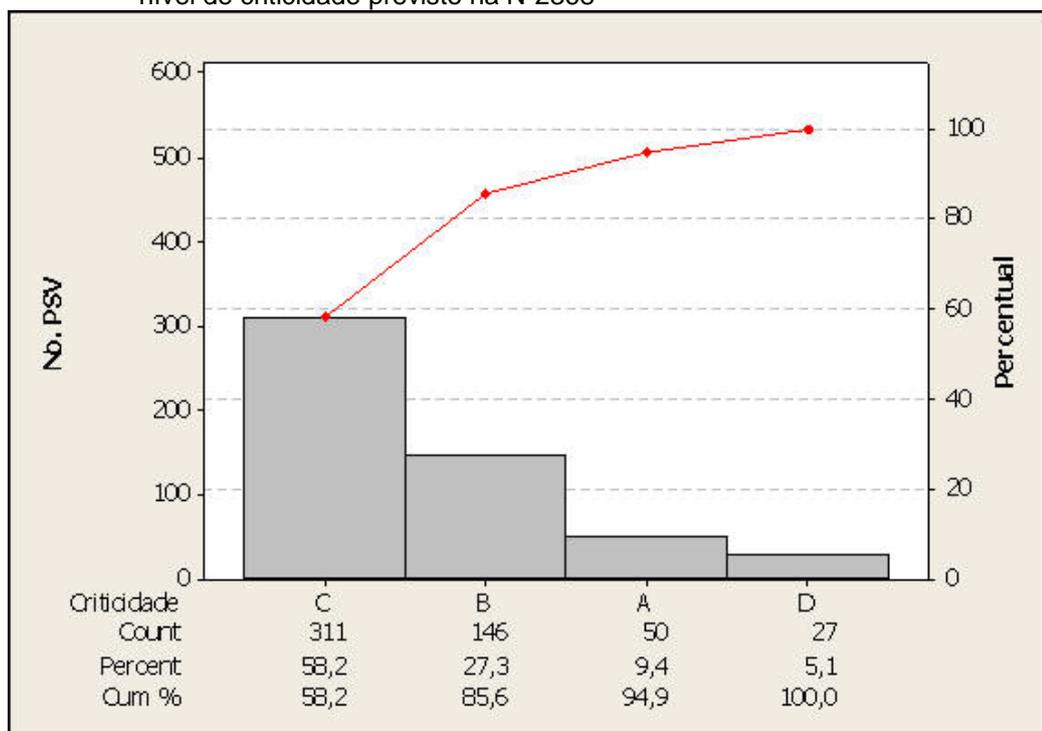
Fonte: Norma Petrobras n-2368 – inspeção de válvulas de segurança e alívio, rev. d.

A norma ainda define que os prazos contidos na figura 2 podem ser expandidos, quando houver histórico confiável, mediante o uso de metodologias de análise de risco, tal como a "Inspeção baseada em risco", normatizada pela API-STD-581. Uma interessante aplicação da IBR para PSV é descrita na monografia de Teixeira (2007).

1.7 Análise dos ganhos possíveis

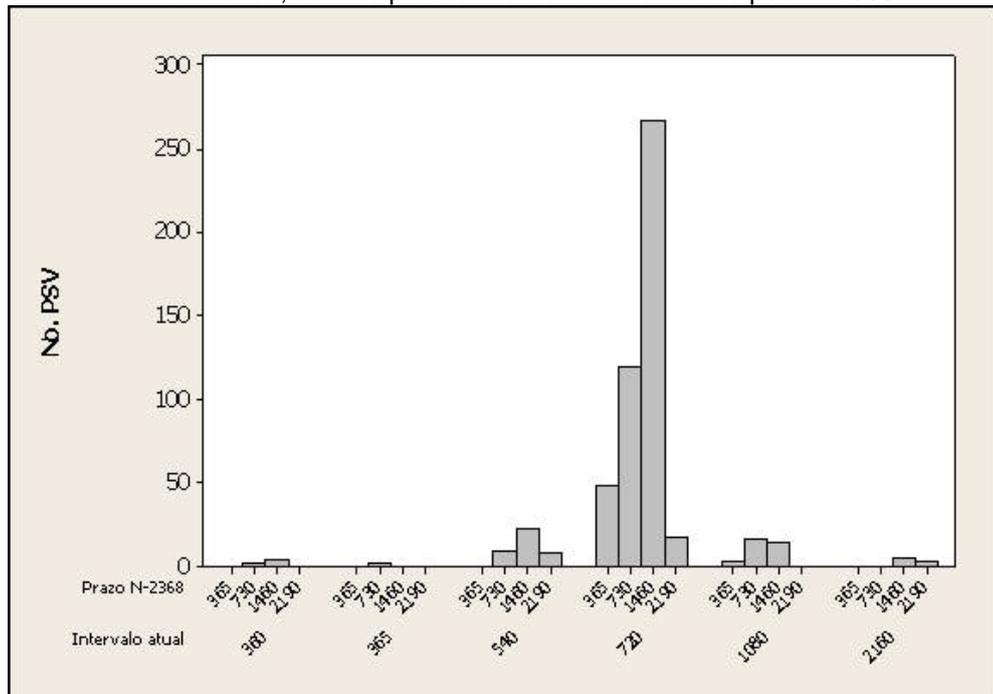
As figura 2 mostra um gráfico de Pareto, da quantidade de válvulas por nível de categoria crítica.

Figura 2 - Gráfico de Pareto da população de PSV da unidade operacional classificadas pelo nível de criticidade previsto na N-2368



Ao todo, a população de válvulas no momento da amostragem consistia de 534 itens. Destes, embora 85,6% possuam categoria “B” ou “C”, 84,5% sofrem intervalos de manutenção de 720 dias (2 anos). Destas, como demonstrado na figura 4, 63% poderiam sofrer inspeções a intervalos 2 a 3 vezes maiores. Evidencia-se aí grande possibilidade de ganho pela adoção dos parâmetros iniciais da N-2368.

Figura 3 - Gráfico de barras relacionando os intervalos de inspeção praticados no momento da análise, com os prazos iniciais recomendados pela N-2368



Pode-se avaliar o retorno do projeto transformando os diversos intervalos em frequências relativas de inspeção. Seja:

$$f_i = \frac{1}{t_i} \quad (1)$$

Onde:

f_i – frequência de inspeção em PSV/dia, da i ésima PSV;

t_i – Intervalo de inspeção em dias da i ésima PSV.

Temos:

$$fr = \sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i} \quad (2)$$

E

$$C_t = \sum_{i=1}^n f_i \times C_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i} C_i \quad (3)$$

Onde:

f_r – frequência relativa de inspeção em PSV/dia;

C_i = Custo individual da PSV;

C_t – Custo relativo total de inspeção em UM/dia.

Para $n = 534$:

$F_r^{\text{atual}} = 0,75$ PSV/dia;

$C_r^{\text{atual}} = 3887,52$ UM/dia;

$f_i^{N-2368} = 0,56$ PSV/dia.

Onde UM significa unidade monetária. Nota-se redução no volume intervenções em 0,19 PSV/dia, com conseqüente redução de exposição de homem-hora ao risco de 25%. A redução em gastos com manutenção será discutida posteriormente.

1.8 Delimitações do estudo de caso

Em virtude da extensão e complexidade do estudo, definiu-se que as PSV dos vasos separadores, vasos depuradores e filtros, das estações remotas da unidade 1225, seriam escolhidas para a análise. Essas PSV foram escolhidas por:

1. Estarem localizadas em áreas remotas, onde a detecção da falha é menos provável e a ação de manutenção cara e demorada;
2. Apresentam extenso histórico de inspeções e grande quantidade de eventos falha registrados;

3. Serem equipamentos que contam com fluido trifásico oriundo de poços que se alternam na produção, ou seja, estão submetidas à condições de processo instáveis.

Com isso, o espaço amostral considerado neste estudo consiste dos dados referentes a 19 PSV, contendo ao todo, 101 eventos no banco de dados referentes ao período de 15 de maio de 1998 a 8 de setembro de 2007, perfazendo 3403 dias de histórico operacional.

2 METODOLOGIA UTILIZADA

2.1 Revisão das técnicas de análise

Existem diversas ferramentas de análise de falhas. Mobley (1999) afirma que as mais usadas são a análise de modos de falha e efeitos (FMEA), a análise da árvore de falhas (FTA), o diagrama de Ishikawa e o diagrama de eventos. Destes, detalharemos os dois principais métodos.

2.1.1. Análise de modos de falha e efeitos (FMEA)

A FMEA é uma “[...] técnica indutiva, estruturada e lógica para identificar e/ou antecipar a(s) causa(s) e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto” (Lafraia, 2001, p. 101). Em virtude da sua abrangência, recomenda-se que a análise seja feita por um grupo de especialistas (Pinto; Xavier, 2001). A técnica consiste em analisar cada componente do equipamento, ou subsistema, e relacionando todos os modos, causas e efeitos de falha que afetem integral ou parcialmente a função do equipamento. Depois, definem-se fatores de frequência de falhas, severidade dos efeitos e probabilidade de detecção das causas. Da multiplicação desses três fatores, produz-se o RPN, ou *risk priority number*, que pode ser ordenado por gráfico de Pareto, ou por diagrama de decisão, para posterior priorização das ações necessárias para reduzir a frequência de falhas. (Commission Electrotechnique Internationale, 2006.a).

2.1.2 Análise da árvore de falhas (FTA)

A FTA é, na verdade, um poderoso diagrama de análise de causa e efeito que usa portas lógicas “E” (interseção) ou “Ou” (união), que permitem estabelecer relações de probabilidade de ocorrência por meio da lógica booleana. A árvore é iniciada pela definição do evento topo, que, neste caso, é o evento falha. A seguir, definem-se os eventos imediatos que levam ao evento topo, e qual a relação entre eles. A técnica permite detalhar a análise indefinidamente, mas, considera-se como evento raiz, aquele evento para o qual o detalhamento não é possível (CEI, 2006.b), ou que foge ao escopo da equipe de análise. Na FTA é possível definir os “conjuntos de corte”, que são os conjuntos de eventos que, se ocorrerem todos, causam o evento de topo. O “corte mínimo”, por sua vez, é o menor conjunto de eventos que causa o evento topo. Por meio da lógica booleana, dado que se conhece a probabilidade de cada um dos eventos ocorrer, sabe-se a contribuição para a probabilidade total de falha do evento topo para cada conjunto de corte, e as ações corretivas podem ser alocadas conforme ordenação desses eventos.

2.1.3 Integração da FMEA e da FTA

Vários autores (Smith, 1988; Lafraia, 2001) ressaltam a natureza complementar que essas duas técnicas possuem na análise de falhas. Por exemplo, as causas raiz descobertas na FTA podem ser transpostas ao formulário de FMEA, com isto, reduz-se o tamanho da FMEA, focando nos itens mais importantes. Além disso, a FTA facilita a compreensão da relação causa e efeito, permitindo a definição correta de conseqüências na FMEA. Por outro lado, Castro¹ (informação verbal) defende o uso do diagrama de decisão da FMEA para uma rápida classificação dos eventos mais importantes, de forma a identificar quais ações podem ser alvo de projetos de melhoria para eliminação das causas, antes que tarefas de detecção sejam designadas na FMEA.

¹ CASTRO, Daniel E. Curso de Análise de falhas e manutenção centrada na confiabilidade (RCM). Manaus: TECEM – Tecnologia Empresarial, 1-3 de nov. de 2007.

Neste estudo, para que haja integração das duas ferramentas analíticas, e para que os resultados possam ser comparados com os bancos de dados existentes, foi proposta uma alteração na seqüencia lógica da FMEA:

1. Definição das funções da PSV;
2. Definição das falhas funcionais (modos de falha da PSV);
3. Definição dos eventos (conseqüências) potenciais destas falhas;
4. Escolha do grau de severidade conforme a SAE-1739;
5. Definição das causas imediatas que levam às falhas funcionais (modos de falha dos componentes);
6. Definição dos mecanismos de dano das causas imediatas;
7. Definição das causas raiz;
8. Escolha dos graus de freqüência de cada causa imediata;
9. Escolha do grau de detecção para as causas imediatas ou básicas;
10. Elaboração do gráfico SO e Pareto de RPN para as causas imediatas;
11. Análise de consistência e definição das causas mais graves;
12. Definição de tarefas preventivas e detectivas de processo que possam atenuar a severidade, ou a freqüência

2.2 Análise estatística de dados

Conforme a NBR-5462/94, confiabilidade é a “capacidade de um item desempenhar uma função especificada, sob condições e intervalo de tempo predeterminado”. Sendo uma probabilidade, a confiabilidade é o complemento da probabilidade de que determinado item não cumpra sua função, evento que, por sua vez, é definido como a falha do item. Sendo assim, os eventos de falha podem ser modelados usando-se uma função densidade de probabilidade que consiga representar não apenas como os eventos ocorridos estão distribuídos, mas que também represente o comportamento esperado das falhas ao longo da vida do equipamento.

A função proposta em 1951 por E. H. Wallodi Weibull, engenheiro sueco, para a modelagem de fenômenos de fadiga de equipamentos é considerada ainda

uma das mais versáteis funções estatísticas para modelar fenômenos associados à falhas de equipamentos mecânicos ou eletro-mecânicos. Embora outras funções, como a gama, sejam ainda mais completas, a função densidade de probabilidade de weibull tem a vantagem de possuir parâmetros que se traduzem em propriedades facilmente compreendidas pelo engenheiro de manutenção.

A função densidade de probabilidade (fdp) de Weibull segue a seguinte formulação:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4)$$

Onde:

β – Parâmetro de forma;

η – Parâmetro de escala;

γ – Parâmetro de localização;

t – Tempo, ou ciclos.

O parâmetro η representa o tempo no qual 63,2% das falhas terão ocorrido em uma população, o parâmetro gama, quando negativo, modela o comportamento conhecido como “vida em prateleira”, ou seja, o equipamento degrada mesmo quando ainda não entrou em operação; Quando o valor de gama é positivo, ocorre o que se chama de “garantia”, ou período de uso em que não ocorrerão falhas. O parâmetro beta é o mais importante para a engenharia, pois, dependendo do seu valor, a função é capaz de modelar os três comportamentos típicos de falhas.

$\beta < 1$ – Taxa de falhas decrescente. Característica de falhas prematuras, típicas de erros de projeto;

$\beta = 1$ – Taxa de falhas constante. Neste caso, a distribuição se reduz à distribuição exponencial, que modela adequadamente as falhas aleatórias características da vida útil do equipamento;

$\beta > 1$ – Taxa de falhas crescente. Característica de fenômenos de degradação e adequada para modelar os estágios finais da vida em uso do equipamento.

A taxa de falhas, por sua vez, é uma função obtida por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

Onde:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_{0,\gamma}^t f(s) ds \quad (6)$$

Substituindo $f(s)$ pela fdp de Weibull e resolvendo a integral obtemos a função confiabilidade de weibull:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

Sendo assim, a função taxa de falhas fica:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

A função taxa de falhas versus o tempo, quando desenhada em um gráfico, toma a forma da conhecida “curva da banheira”.

Portanto, dados os valores dos parâmetros da distribuição, pode-se modelar o tempo até a falha para o equipamento;

Entretanto, na maioria das vezes, os parâmetros não são conhecidos e precisam ser estimados. Existem diversas maneiras de estimar os parâmetros a partir dos dados de falha dos equipamentos. O método mais simples consiste em tornar linear a função densidade acumulada de falhas, com o auxílio de gráficos. mas outros métodos analíticos, como a maximização da função de verossimilhança, ou o método dos mínimos quadrados são mais adequados, notadamente quando há apoio de softwares.

2.3 Análise das falhas em PSV

PSV possuem muitos mecanismos de dano, dependendo da condição operacional, frequência de abertura, fluido de trabalho, etc. Conforme Rodrigues (2002, apud TEIXEIRA, 2007) os mecanismos mais comuns em PSV são corrosão puntiforme ou homogênea, com ou sem depósito, depósitos de substâncias estranhas oriundas do meio, batimento –fenômeno provocado pela perda de carga do fluido após liberação pela PSV— manuseio descuidado da válvula durante transporte ou ajuste, etc. De fato, na população amostrada, alguns mecanismos de falha apontados pelo autor foram evidenciados, mas, quase sempre, não houve preocupação com a investigação das causas raiz dos problemas apresentados. O conhecimento da causa raiz das falhas é fundamental para estabelecer qual a estratégia mais custo-eficiente para a manutenção, entretanto, mesmo bancos de dados internacionais, como o *Offshore Reliability Data*— OREDA—, ou o ORBIT, da DET NORSKE VERITAS (TEIXEIRA, 2007), possuem dados estatísticos apenas para os modos de falha.

3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

3.1 Elaboração da FMEA

A despeito da API, a equipe de elaboração da FMEA— composta por dois técnicos de inspeção, um instrumentista, uma ajudante e um engenheiro de inspeção— definiu as quatro funções para PSV presentes na tabela 1.

Para cada uma das funções foram definidas falhas funcionais, posteriormente padronizadas conforme a ISO-14224.

Tabela 1 - Funções de uma PSV conforme definição na FMEA preparada durante este estudo

Funções	
F1	Atuar na pressão de ajuste com tolerância de -3%
F2	Aliviar pressão na vazão máxima até a sobrepressão
F3	Fechar até 10% abaixo da pressão de ajuste
F4	Manter estanqueidade na posição fechada

Tabela 2 - Falhas funcionais (modos de falha) das PSV. Códigos dos modos extraídos da ISO-14224

Função	Falha Funcional	
F1	FTO	Não atuar até 120% da PMTA
	SPO	Atuar abaixo de 97% da pressão de ajuste
F2	LOO	Não aliviar pressão na vazão máxima até a sobrepressão
F3	FTC	Não Fechar até 10% abaixo da pressão de ajuste
F4	LCP	Não manter estanqueidade

A falha funcional mais perigosa, e mais onerosa, que a PSV pode apresentar é a de não abrir quando solicitada. Esta falha pode levar à danificação do equipamento protegido, podendo causar sua ruptura, com conseqüente liberação do fluido e da pressão contidos no equipamento. Em alguns casos, esta liberação é catastrófica, causando danos graves às instalações, às pessoas e ao meio-ambiente, podendo trazer sérios danos à imagem da organização e levar a uma investigação pública. Com isso, os eventos potenciais, ou conseqüências globais foram definidos na tabela 3.

Tabela 3 - Eventos potenciais para os modos de falha definidos na FMEA. A codificação de severidade seguiu a tabela proposta para a MFMEA na SAE-1739

Modo de falha	Evento potencial		Severidade
FTO	EP1	Possível ruptura do equipamento protegido.	10
		Conseqüente dano ao meio ambiente, risco grave à segurança	
SPO	EP2	Perda de produção	1
LOO	EP3	Possível dano ao equipamento protegido.	7
FTC	EP2	Perda de produção	2
LCP	EP2	Perda de produção	2

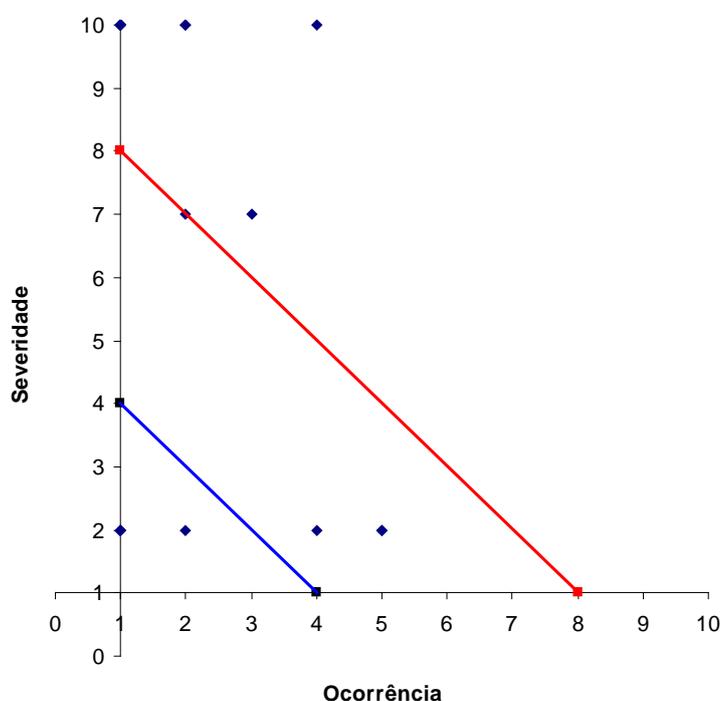
As severidades foram escolhidas conforme a norma SAE-1739. As maiores severidades escolhidas representam riscos à integridade do equipamento e dos operadores, enquanto que as menores representam riscos menores ou sem importância.

As causas para cada modo de falha da PSV são, na verdade, modos de falha dos seus componentes, bem como outras falhas de processo ou projeto. Sendo assim, optou-se aqui por expandir a FMEA, incluindo o mecanismo e a causa raiz, quando possível, de cada causa imediata. Isto foi obtido solicitando-se da equipe que formulasse as causas de forma a mencionar o componente e como este viria a

falhar. Foram identificadas 23 causas relacionadas aos modos de falha. A ordenação das causas que deveriam ser estudadas com o auxílio da FTA foi feita por meio de dois critérios:

1. Gráfico de iso-risco de severidade VS. Ocorrência;
 2. Pareto dos maiores valores de RPN para cada causa.
- Os gráficos 1 e 2, e a tabela 4 apresentam os resultados.

Gráfico 1 - Gráfico de iso-risco, considerando os valores de ocorrência e severidade das causas dos modos de falha. Causas acima da linha vermelha são consideradas graves



Qualquer tomada de decisão probabilística costuma levar em conta apenas os valores da consequência e a probabilidade de ocorrência. Isto é representado qualitativamente pelo gráfico SxO. Entretanto, quando se considera a capacidade de detecção da causa ou do mecanismo, antes que a falha aconteça, observa-se que algumas causas consideradas graves são bloqueadas pelo plano de inspeção e rotina existentes. Por outro lado, causas consideradas irrelevantes tornam-se críticas pois que não podem ser previstas. De fato, as três variáveis devem nortear a

escolha da melhor decisão econômica e técnica para a organização. Esta estratégia frequentemente depende dos ativos a que se aplica, de sua condição operacional, mas, fundamentalmente, das conseqüências, notadamente as não mensuráveis.

Gráfico 2 - Pareto pelo número RPN para as causas de falha. Em vermelho estão representadas as causas graves. Em azul, as causas controladas e, em verde, as consideradas irrelevantes

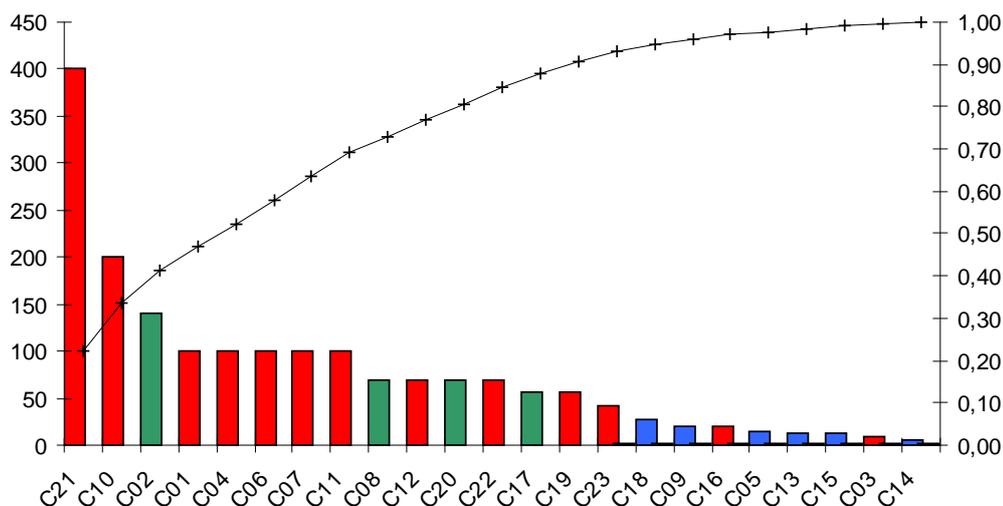


Tabela 4 - Principais causas observadas, seus números de prioridade de risco e os modos de falha que causam

Causa		RPN	MF
C21	Suporte do disco travado no guia	400	FTO
C10	Haste empenada	200	FTO
C02	Bocal obstruído	140	LOO
C01	Anel de regulagem solto	100	FTO
C04	Carga sólida	100	FTO
C06	Corpo estranho	100	FTO
C07	Disco colado	100	FTO
C11	Haste travada	100	FTO
C08	Disco danificado	70	LCP
C12	Instalação inadequada	70	FTO
C20	Sede danificada	70	LCP

Tomando a tabela 4 como ponto de partida, pode-se desenvolver um plano de inspeção eficaz, além de designar tarefas preventivas e detectivas para diminuir a severidade das conseqüências ou aumentar a capacidade de detecção antes da

falha. Além disso, a identificação dos eventos raiz nos relatórios torna possível a eliminação gradual e definitiva das causas, ou a predição do comportamento das falhas.

Antes, porém, de realizar uma análise de árvore de falhas para as causas com maior RPN, é importante notar que não há dados estatísticos coletados para as causas. Os mesmos puderam ser extraídos por modo de falha, o que, de certa forma, permite a comparação com normas e bancos de dados existentes. Com isso, embora na fase de projeto básico a eliminação de defeitos possa ser uma ação custo eficiente, após o projeto concluído e o equipamento operando, quase sempre alterações de projeto se tornam onerosas. Em vários casos pode ser mais econômica uma ação de bloqueio durante a manutenção.

3.2 Análise dos dados de falha

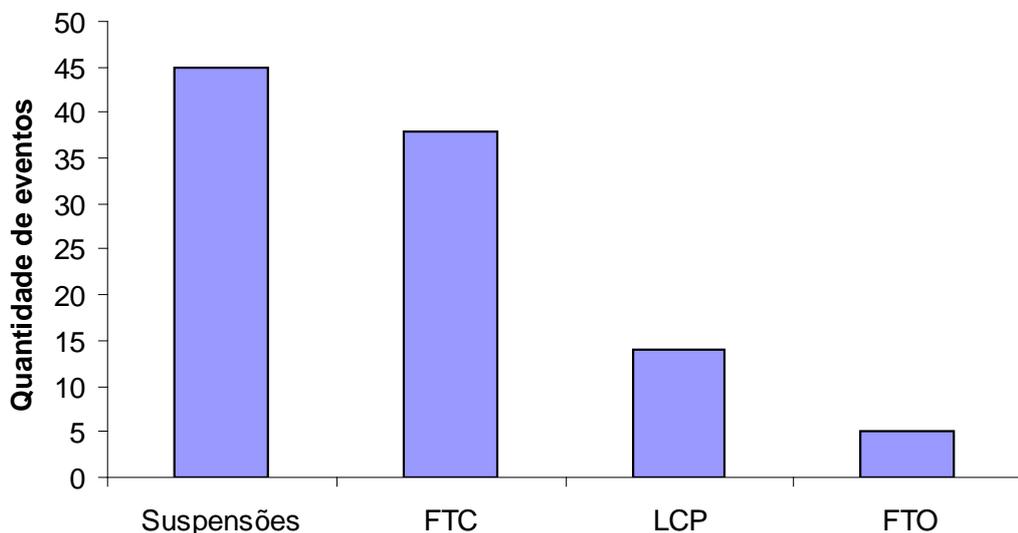
Após a verificação de todos os relatórios técnicos e de calibração das PSV da amostra, os dados foram sintetizados em uma tabela onde os eventos foram ordenados cronologicamente, classificados por PSV.

As premissas usadas para a montagem da tabela de eventos foram as seguintes:

- a) O primeiro evento de cada PSV foi excluído dos dados, pois foi usado como evento iniciador, uma vez que não havia registro da data de início de operação de cada PSV;
- b) Os eventos de manutenção onde o teste de bancada não indicou falha de qualquer tipo foram classificados como suspensões (S);
- c) Os eventos cujo modo de falhas pode ser identificado foram classificados como falhas (F) e o modo identificado pelos códigos apresentados neste trabalho;
- d) O tempo decorrido entre cada evento foi calculado para cada PSV independentemente das demais;
- e) Um último evento de suspensão foi calculado a partir da data final da análise e a data do último evento ocorrido em cada PSV.

A premissa a é justificada pela teoria geral da renovação (METTAS e ZHAO, 2005 apud Reliasoft, 2005), considerando que cada ajuste na PSV renova-a para a condição de “tão boa quanto nova”. Esta premissa foi validada com os mesmos dados tabelados, excluídas as suspensões intermediárias, e calculados os tempos até a falha de forma acumulativa, num formulário próprio do aplicativo Weibull++7®, e calculando o fator q de renovação. O resultado obtido foi $q=1$, o que significa 100% de renovação e, portanto, permite considerar que a PSV começa como nova cada campanha.

Figura 1 - Distribuição da quantidade modos de falha e das suspensões observadas nos 101 eventos considerados para a análise de dados



Para preservar os dados da empresa, não é apresentada a tabela de falhas, entretanto, o gráfico da figura 5 mostra o quantitativo de modos de falha e de suspensões observados.

Usando os aplicativos Weibull++7® e MINITAB R15®, os parâmetros da distribuição de cada modo de falha foram ajustados pela maximização da função de verossimilhança numa distribuição weibull, onde γ foi considerado como zero, dado que PSV não apresentam vida de prateleira (são ajustadas antes de ir para o campo); e nem apresentam tempo de garantia, pois estão expostas a variações de pressão desde o momento de sua instalação. Os resultados computados pelos aplicativos são resumidos nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Comparação entre os resultados da determinação de parâmetros em dois dos programas comerciais mais usados

Parâmetros	Weibull++7		MINITAB 15	
	β	η	β	η
FTC	1,1490	975,06	1,14889	975,087
LCP	1,0313	2717,94	1,03128	2718,02
FTO	1,1400	5798,44	1,14006	5797,36
TODOS	1,1174	687,53	1,11742	687,53

Tabela 6 - Erro entre os valores encontrados nos dois programas usados para o ajuste dos parâmetros para a distribuição de weibull

Parâmetros	Erro, %	
	β	η
FTC	0,010%	0,003%
LCP	0,002%	0,003%
FTO	0,005%	0,019%

Não existem dados para o modo de falha LOO pois não há como verificar esta falha em bancada. Entretanto, o modo de falha LOO pode levar a PSV a permanecer aberta por mais tempo e, eventualmente, causar danos na sede, disco, mola ou suporte. Neste caso, o teste em bancada pode diagnosticar a falha como FTO, LCP ou FTC. Para saber qual o real impacto do modo de falha LOO é necessário uma investigação do tempo de abertura da PSV, que só pode ser realizado mediante instalação de sensores de vazão na saída de cada PSV, que permitam mensurar o seu tempo de abertura contra o perfil de pressões no equipamento protegido.

3.3 Comparação dos resultados obtidos

Teixeira (2007) informa os parâmetros de distribuição weibull para PSV convencionais testadas pela DET NORSKE VERITAS, e usadas em seu programa ORBIT. A tabela 7 resume os valores.

Tabela 7 - Parâmetros de weibull para PSV convencionais obtidas de 4300 testes de bancada pela DNV

Serviço	η	β
Pouco crítico	13833,5	1,6
Moderadamente crítico	6533,5	1,8
Altamente crítico	4818,0	2,0

Fonte: Adaptado de TEIXEIRA (2007)

Nota-se claramente que os dados da DNV não levam em consideração o comportamento dos diversos modos de falha, juntando todos os eventos dentro de uma única distribuição. Os dados da população deste estudo, se agrupados desconsiderando os modos de falha, resultam numa distribuição com parâmetros $\beta = 1,1174$ e $\eta = 687,53$, muito mais severa que os dados apresentados pela DNV.

Embora os dados do OREDA sejam apresentados em distribuição exponencial, podemos comparar os resultados forçando o ajuste dos dados a uma distribuição exponencial e comparar o valor do parâmetro λ . Para os dados do presente estudo, $\lambda = 0,0014$, enquanto que, para o OREDA 2002, o parâmetro pode assumir os resultados da tabela 8.

Tabela 8 - Dados do OREDA 2002 para falhas em PSV, considerando o modo de falha e o tipo de serviço.

Modo de falha	Crítico	Degradado λ	Incipiente
FTC	0,0000006		
FTO	0,0000025		
LCP	0,0000011		0,0000153
SPO		0,0000119	

Observa-se que, para a comparação com o OREDA, a taxa de falha da população de PSV do presente estudo também é mais severa.

3.4. Retroalimentação da FMEA

Quanto menor o valor de β , menor a previsibilidade das falhas. Analisando o resultado da determinação de parâmetros para as distribuições dos modos de falha identificados na FMEA, pode-se observar que todos possuem parâmetro β próximo a 1, valor para o qual a weibull se reduz à distribuição exponencial. Neste caso, conceitualmente, não é possível prever ações de manutenção preventiva, dado que a exponencial não possui “memória” (Reliasoft, 2007), e a probabilidade de um evento ocorrer é inalterada pela intervenção de manutenção.

Para determinar a melhor estratégia para a manutenção, é preciso levar em consideração as conseqüências da falha. Normalmente, as conseqüências podem

ser traduzidas para valores monetários, que permitem uma rápida decisão pela comparação do valor total do plano de manutenção, considerados os riscos de a falha ocorrer, e os custos de manutenção preventiva. Entretanto, no caso do modo de falha FTO, os riscos não podem ser contabilizados desta maneira, por haver perigo à vida humana. Observamos, ainda assim, que a distribuição weibull para o modo de falha FTO é menos severa (possui menor η e β maior) que as distribuições para os demais modos de falha, de forma que é preciso realizar duas análises. Para o modo de falha FTO, o risco de perda de vidas humanas é inaceitável. Sendo assim, para o tamanho da amostra (19 PSV) uma falha em campanha equivale a 1/19, ou 5,26% da amostra apresentar falha. Tomando este valor como a probabilidade de uma falha, temos que $R(t) = 94,74\%$, ou 0,9474. Usando a equação (6) com os parâmetros obtidos para o modo de falha FTO, temos:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-0}{5798}\right)^{1,14}} = 448,32 \text{ dias}$$

Para os demais modos de falha, podemos usar a seguinte relação :

$$C(t) = \frac{C_p \times R(t) + C_c \times (1 - R(t))}{\int_0^t R(s) ds} \quad (9)$$

Onde:

$C(t)$ – Função do custo total da estratégia;

C_p – Custo fixo da manutenção preventiva;

C_c – Custo fixo da manutenção corretiva.

Resolvendo a equação com os parâmetros específicos para cada modo de falha, e considerando que, para o estudo de caso $C_c = 11,32 C_p$ obtemos os resultados representados na tabela 9.

Tabela 9- Resultados obtidos para todos os modos de falha. Nota-se que a maior campanha para FTO, determinada pelo menor custo, não pode ser adotado em virtude do risco não contabilizável de vida humana

Parâmetros	Custo, UM/dia	Campanha, dia
FTC	6,75	800
LCP	2,42	19000
FTO	1,14	5000
Todos (FTO, FTC, LCP)	9,65	700

Os resultados da tabela 9 podem ser aplicados às PSV conforme os modos de falha que apresentarem. Para as PSV da amostra, como a menor campanha foi determinada pelo cálculo da probabilidade de uma falha ocorrer em campanha com modo de falha FTO, o intervalo adotado para todas as PSV é de 448 dias, que é maior que o intervalo previsto na N-2368 para as PSV operando com categoria A. Para as demais, pode-se usar o critério de custo, em virtude do modo de falha preponderante. Ou usar o caso geral para todos os modos de falha. Para a campanha de 448 dias, o custo total por PSV, usando a distribuição para todos os modos de falha fica em 9,74 UM/dia.

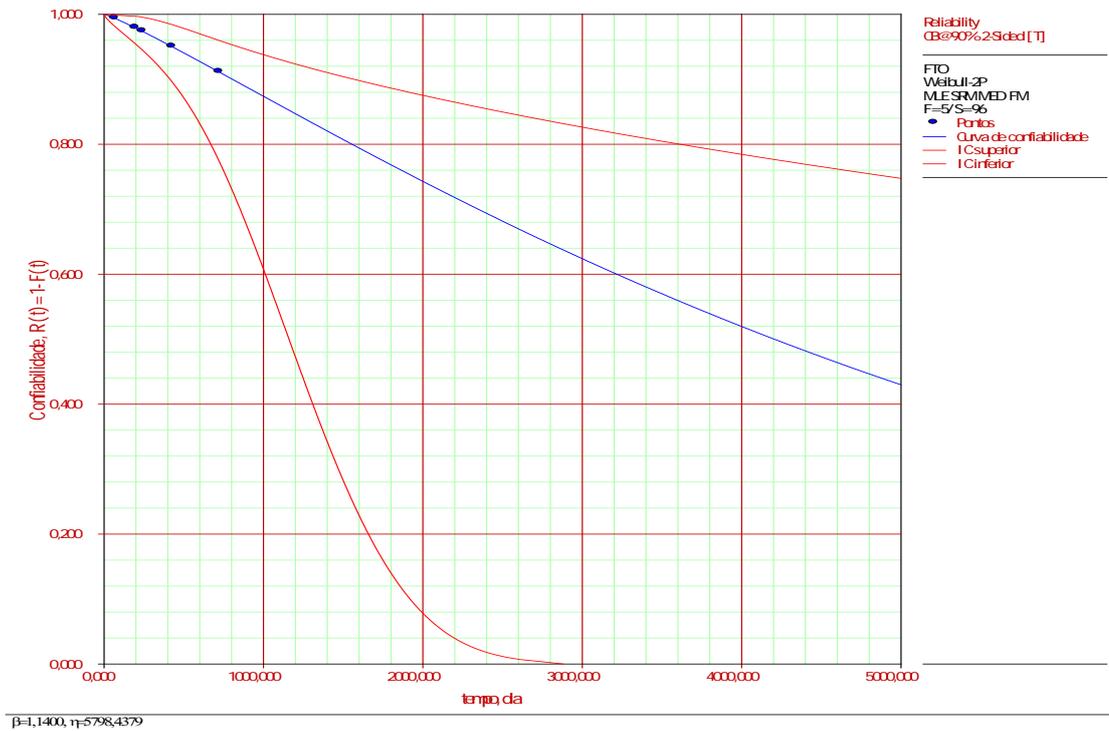
4 CONCLUSÕES

4.1 Considerações gerais e recomendações

A metodologia aplicada permite determinar a melhor estratégia para as PSV da amostra considerada, levando-se em consideração os custos de manutenção e a salvaguarda à vida humana. A FMEA, como ferramenta analítica permite orientar os serviços de manutenção e inspeção em PSV de forma a auxiliar na redução da incidência de falhas em PSV e de servir de guia ao técnico para o correto diagnóstico das falhas observadas. No futuro, a análise dos dados, a partir da correta anotação das causas prováveis, irá permitir a identificação das causas passíveis de tratamento usando a FTA, visto que distribuições de falhas cujo beta seja igual ou inferior a 1 não podem ser bloqueadas efetivamente por ações de manutenção preventiva.

É importante notar também que, devido a pequena quantidade de falhas FTO observadas, o intervalo de confiança dos dados é largo para tempos maiores do que o maior dos tempos entre falhas, como pode ser visto no gráfico 3.

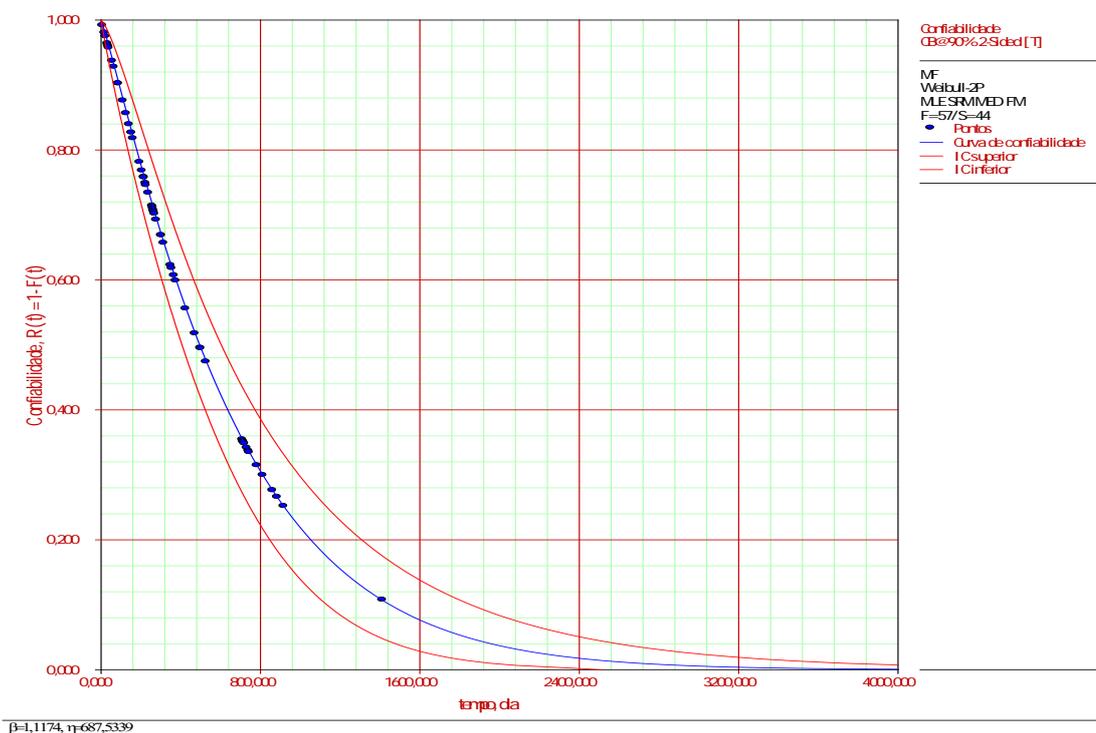
Gráfico 3 - Curva de confiabilidade para o modo de falha FTO, mostrando os limites de confiança calculados pela matriz de Fisher, com 0,9 de confiança bilateral



Com isso, para PSV que possuam falhas FTO em seu histórico, é importante atender ao prazo máximo, ou realizar novo estudo com mais eventos.

Para o caso geral, a curva de confiabilidade apresenta-se como no gráfico 4.

Gráfico 4 - Curva de confiabilidade para o conjunto de modos de falha agrupados, mostrando os limites de confiança calculados pela matriz de Fisher, com 0,9 de confiança bilateral



Nota-se que os limites de confiança são mais próximos da linha média, o que confere maior segurança para a escolha de intervalos superiores.

4.2 Análise do retorno financeiro e exposição ao risco

Os custos diários calculados pela distribuição de weibull para todos os modos de falha, para cada categoria da N-2368 fica como na tabela a seguir, conforme duas estratégias possíveis.

Tabela 10 - Resumo de custos unitários para duas estratégias de manutenção para as PSV da população

N-2365	Caso 1		Caso 2	
	Custo, UM/dia	Campanha, dia	Custo, UM/dia	Campanha, dia
A	9,74	448	9,74	448
B	9,66	730	9,66	700
C	9,75	1460	9,66	700
D	9,81	2190	9,66	700

Para analisar o retorno financeiro e de segurança potenciais, aplica-se as equações (2) e (3) para os novos prazos, obtendo-se:

$$fr^1 = 0,53 \text{ PSV/dia.}$$

$$Cr^1 = 2750,10 \text{ UM/dia.}$$

$$fr^2 = 0,79 \text{ PSV/dia.}$$

$$Cr^2 = 4095,78 \text{ UM/dia.}$$

A melhor opção, portanto, é a estratégia 1, onde há redução de 29% na quantidade de manutenções, com conseqüente redução na exposição ao risco, além de representar economia de 1137,42 UM/dia, ou 415.158,30 UM/ano com redução de tarefas e consumo de sobressalentes.

Com este resultado, a equipe ganha tempo para atuar na análise das causas raiz, elaboração de FTA, etc. A economia pode ser aplicada na aquisição de equipamentos de inspeção no campo, sensores de monitoração e implantação de modificações de projeto.

REFERÊNCIAS

AL-NAJJAR, B. **The lack of maintenance and not maintenance which costs:** A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's **business**. International Journal of Production Economics. 107. 260-273. Novembro de 2006. Elsevier. <disponível em www.sciencedirect.com> Acesso: 13 mar. 2009.

AMERICAN PETROIL INSTITUTE – **API-520** – *Sizing, selection and installation of pressure-relieving devices in refineries*. Washington-US, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-5462**: confiabilidade e manutenibilidade: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Manual Técnico de caldeiras e vasos de pressão**. Brasília: MTE, 2004. 124 p.

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. **CEI-IEC 61025** : Analyse par arbre de panne (APP). Geneva-SW, 2006.

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. **CEI-IEC 60812** : Techniques d'analyse de la fiabilité du système – Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). Geneva-SW, 2006.

ETI, M. C.; OGAJI, S. O. T. PROBERT, S. D. **Development and implementation of preventive-maintenance practices in Nigerian industries**. Applied Energy. 83. 1163-1179. Março de 2006. Elsevier. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 27 nov. 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-9001**: quality management systems: requirements. Geneva-SW, 2001.

LAFFRAIA, João R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MITRA, A. **Fundamentals of quality control and improvement**. New York - US: Macmillan publishing Co., 1993, 663p.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. New York, US: Butterworth-Heinemann, 2002;

MOBLEY, R. K. **Root Cause Failure Analysis**. Boston, US: Newnes, 1999.

MURTEIRA, Bento J. F. **Probabilidade e Estatística**, Vol. 1. Torres Vedras, PT: McGraw-Hill, 1990.

PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Confiabilidade, a quarta dimensão da qualidade**, Vol. 1. São Paulo: Reliasoft Brasil, 2006.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio A. Nascif. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2001.

RELIASOFT CORPORATION. **System analysis reference**. Tucson-USA: Ed. Reliasoft publishing, 2007.

RELIASOFT CORPORATION. **Life data analysis reference**. Tucson-USA: Ed. Reliasoft publishing, 2005.

SMITH, David J. **Reliability and maintainability in perspective**. Hong Kong: Macmillan, 1988

SPIEGEL, Murray R.. **Estatística**. Tradução de Pedro Cosentino. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1974

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; THOMAS, H. **Engenharia da qualidade em sistemas de produção**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990;

TEIXEIRA, D. C. **Estudo comparativo entre diferentes sistemáticas para determinação de planos de inspeção para válvulas de segurança**. Salvador: Universidade Salvador - UNIFACS, 80 p. Monografia, 2007. Departamento de Engenharia e Arquitetura, Engenharia Mecânica. Salvador, 30 de novembro de 2007.



Artigo recebido em 13/07/2014 e aceito para publicação em 31/10/2015
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v15i4.1794>