

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE COMPRESSORES ALTERNATIVOS SEMI-HERMÉTICOS DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Izeds Felipe Facchini Bassetto

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária
05508-900 – São Paulo - Brasil
E-mail: izedsfelipe@hotmail.com

Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária
05508-900 – São Paulo - Brasil
E-mail: ahneto@usp.br

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas
Mecânicos
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária
05508-900 – São Paulo - Brasil

Abstrat

Refrigeration systems are repairable systems. This means that these systems components can be maintained. The most known refrigeration system is the vapor compression cycle. In this cycle, the compressor is the most complex and expensive component. So, the user should take special care, beside its specific problems, it can surfer damages caused by the incorrect work from the others system components. Among the compressor family, one can say that the reciprocating compressor is the most used, with capacities up to 300 kW. Reliability means the probability of some equipment can not perform its requested function for an established time period, under defined operation conditions. Hardly all population elements are well-know and, because of that, the equipment parameters should be estimate with the data analysis from the population. One of the tools to allow actions to improve the reliability is the failure mode and effect analysis. This paper proposes to use the methodology of Failure and Effect Mode Analysis to evaluate the main failures found in reciprocating compressors used in refrigeration systems and suggests actions to correct those failures.

Key-words: Reliability, Reciprocating compressors, Refrigeration

¹Artigo extraído da tese: “Estudo de Confiabilidade de Compressores Alternativos de Sistemas de Refrigeração”, de Izeds Felipe Facchini Bassetto, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica sob a orientação do Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto e co-orientação do Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza.

Resumo

Sistemas de refrigeração são sistemas reparáveis. Isto significa que os componentes destes sistemas podem sofrer manutenção. Entre estes sistemas o mais conhecido é o que opera com ciclo de compressão de vapor. Neste ciclo, o compressor é o equipamento mais complexo e de maior custo. Dessa forma, deve-se tomar especial cuidado, pois além de problemas diretos, ele está sujeito a sofrer danos decorrentes do funcionamento falho de todos os outros componentes do sistema. Dentre os compressores existentes, o alternativo domina a faixa de capacidades inferiores a 300 kW. Confiabilidade é a probabilidade de um item poder desempenhar sua função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso. Dificilmente se tem acesso a todos os elementos de uma população, portanto devem-se obter estimativas dos parâmetros do comportamento do equipamento, com a análise dos dados de amostras retiradas da população. Uma das ferramentas para atuar na confiabilidade é a Análise de Modos e Efeitos de Falha. Este trabalho se propõe a utilizar a metodologia de Análise de Modos e Efeitos de Falha para avaliar as principais falhas encontradas em compressores alternativos usados em sistemas de refrigeração e sugerir ações para correção destas falhas.

Palavras-chave: Confiabilidade, Compressores Alternativos, Refrigeração.

1. Introdução

No mundo moderno, com o aumento do número de pessoas que ocupam os mais diversos locais do planeta e com a ampliação da tecnologia, a refrigeração vem recebendo cada vez mais importância, pois atua em diversas áreas: proporcionando conforto ambiental das pessoas, melhorando a sensação de bem estar e aumentando assim a sua produtividade; facilitando a conservação, armazenamento e o transporte de alimentos. Em alguns casos especiais, a refrigeração faz parte do processo de transformação dos alimentos. Nesse sentido, os sistemas de refrigeração atuam tanto diretamente quanto indiretamente na produção, pois em determinados processos é necessário à utilização de equipamentos que alterem a temperatura, fazendo parte do processo, enquanto alguns equipamentos e processos necessitam funcionar em uma temperatura controlada.

Em uma instalação de refrigeração ou climatização, a função do compressor é aspirar uma determinada quantidade de fluido refrigerante no estado de vapor produzido pelo evaporador e elevar a sua pressão e, conseqüentemente, a sua temperatura. Em seguida, o gás é liquefeito no condensador, sendo sua pressão reduzida na válvula de expansão e finalmente voltando para o estado de vapor no evaporador, onde o fluido refrigerante absorve energia (calor) que deve ser retirada do ambiente condicionado para depois ser novamente rejeitada no condensador.

Desta forma, na indústria de refrigeração, compressores são equipamentos essenciais, e defeitos e mau funcionamento destes componentes resultam em grandes perdas devido à deterioração de produtos e desconforto térmico (Stoecker, 1994).

Segundo Stoecker (1994), na indústria de refrigeração são utilizados todos os principais tipos de compressores: alternativos, rotativos de parafuso, de palhetas e centrífugos. Entre eles, os mais comuns em instalações com capacidade de até 1.000 kW são os alternativos e os de parafuso. Compressores centrífugos encontram aplicação na indústria química e de processos, uma vez que tanto podem ser acionados por turbinas a gás quanto por motores elétricos. Os compressores rotativos de palhetas encontram aplicação como “booster” em sistemas de compressão de estágio duplo de pressão.

Os compressores alternativos são construídos em distintas concepções, destacando-se entre elas os tipos aberto, semi-hermético e selado (hermético). No compressor aberto o eixo de acionamento atravessa a carcaça sendo, portanto, acionado por um motor exterior. No compressor semi-hermético, a carcaça exterior aloja tanto o compressor propriamente dito quanto o motor de acionamento. Normalmente este tipo de compressor opera com fluido refrigerante halogenado que entra em contato com o motor promovendo o seu resfriamento. Os compressores herméticos são utilizados na refrigeração doméstica e condicionadores de ar até potências da ordem de 30 kW. Eles são semelhantes aos semi-herméticos, destes diferindo pelo

fato da carcaça só apresentar acesso para entrada e saída do refrigerante e para as conexões elétricas do motor.

O compressor alternativo tem sido ao longo dos anos, o cavalo de batalha da refrigeração industrial, apesar de ter perdido um pouco de espaço no mercado para os compressores de parafuso. Entretanto, o compressor alternativo ainda domina a faixa de capacidades inferiores a 300 kW (85 TRs), para a qual apresenta maior eficiência que o de parafuso. Acima desta faixa, o tamanho avantajado do compressor alternativo constitui uma desvantagem.

A tendência que se verifica nos dias de hoje é o domínio absoluto do compressor alternativo na faixa de baixas capacidades, como já foi observado. Mesmo em instalações de grande porte, onde se utiliza o compressor parafuso, o alternativo pode encontrar aplicação como compressor de apoio, operando quando ocorrem picos de carga.

Uma preocupação crescente é a eficiência dos sistemas de refrigeração que é atingida pela manutenção, bem realizada, com a redução do consumo de energia. A incorreta operação e as falhas dos equipamentos acarretam grande desperdício de energia (Tassou, Grace; 2003); (House, Lee, Norford; 2003).

Sistemas de refrigeração, climatização, ventilação e aquecimento são sistemas reparáveis. Isto significa que os componentes destes sistemas podem sofrer manutenção durante a vida útil do sistema como um todo.

Em um ciclo de compressão de vapor, o compressor é o equipamento mais complexo e de maior custo. Dessa forma, deve-se tomar especial cuidado, pois além de problemas como desgaste e falta de lubrificantes, ele está sujeito a sofrer danos decorrentes do funcionamento incorreto ou falho de todos os outros componentes.

A atividade de manutenção pode ser considerada uma função estratégica dentro de uma organização fabril, pois a mesma é responsável por manter os equipamentos operando, com a capacidade exigida ou mesmo superior a mínima requerida para execução da atividade desejada (Cardoso, 2004).

Por tais motivos, o estabelecimento de rotinas para organização e gerenciamento da manutenção deve ser elaborado mediante estudos cuidadosos. Como a manutenção normalmente abrange toda a instalação, os seus procedimentos devem atender às necessidades de todos os departamentos, seções e divisões de toda a fábrica.

Outro aspecto que deve ser levado em conta e é cada vez mais lembrado nos dias de hoje, é o impacto ambiental das soluções adotadas. Várias nações têm se unido, entre elas o Brasil, para se chegar a uma solução os problemas como a destruição da camada de ozônio e o aquecimento global.

A confiabilidade e a disponibilidade são palavras do cotidiano da manutenção (Pinto, Xavier; 2005).

O termo confiabilidade vem do inglês “reliability” e teve origem na análise de falhas de equipamentos eletrônicos para uso militar durante a década de 50 nos Estados Unidos.

A seguir são apresentadas algumas entidades e suas definições para o termo confiabilidade, a saber:

- “*European organization for quality control*” (1965): “É a medida da capacidade de um produto funcionar corretamente, por um período e em ambiente definidos e é avaliada como uma probabilidade”.
- “*US military handbook*” (1970): “A probabilidade que um item irá executar sua função sobre determinadas condições e durante um determinado período de tempo”.
- “*UK Ministry of defense*” (1979): “A aptidão de um item em executar, ou ser capaz de executar, uma determinada função sobre determinadas condições sem falhar por um período de tempo estabelecido ou de operação é também expressa como uma probabilidade”.

A definição da confiabilidade como uma probabilidade é muito interessante, pois permite a sua quantificação de forma que possa ser entendida de forma mais ampla, permitindo o uso das várias ferramentas estatísticas.

Na década de 1960, foi criado pela “Federal Aviation Administration” um grupo para estudo e desenvolvimento de um programa de confiabilidade para a indústria aeronáutica. Das várias conclusões desenvolvidas pelo grupo, duas delas provocaram uma reorientação nos procedimentos até então em vigor:

Se um item não possui um modo de falha predominante e característica de falha, revisões programadas afetam muito pouco o nível de confiabilidade.

Para muitos itens, a prática da manutenção preditiva (manutenção realizada com intervalos pré-estabelecidos) não é eficaz.

Com base nestas conclusões, foi desenvolvido o conceito de confiabilidade que é a probabilidade de um item poder desempenhar sua função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso.

Testes de confiabilidade possibilitam, com base em estudos/testes de confiabilidade, caracterizar os comportamentos de confiabilidade, da probabilidade de falha e da taxa de falha em relação ao tempo de um componente ou sistema.

No caso de um estudo de confiabilidade em relação a um determinado grupo de falhas, testes de confiabilidade permitem: a melhoria da qualidade; o estudo sobre aspectos relacionados à fixação do período de garantia; ou a reposição de componentes defeituosos de um produto já em produção. Estes testes permitem a obtenção de uma quantidade de elementos suficiente para atender as exigências de critérios estatísticos quanto a compor uma amostra para ensaio de falhas.

Difícilmente se tem acesso a todos os elementos de uma população e, portanto, devem-se obter estimativas dos parâmetros do comportamento do equipamento. Isto pode ser feito por meio da análise dos dados de amostras retiradas da população (família de equipamentos em estudo), obtendo-se uma estimativa dos parâmetros significativos desta população analisada.

O ensaio de componentes ou sistemas nem sempre é executado até que ocorra a falha de todos os elementos da amostra. Nesta situação diz-se que houve um ensaio censurado.

Na literatura estes ensaios são chamados de truncados. Neste tipo de ensaio, as unidades que não falharam são conhecidas como fora de escopo, sobreviventes, removíveis ou suspensas.

Ensaio censurado simples acontecem quando todas as unidades são acionadas simultaneamente durante o teste e os ensaios são interrompidos e analisados antes que todas as unidades tenham falhado.

Um ensaio é conhecido como censurado pela direita quando algumas unidades (equipamentos) não falharam, e suas vidas úteis são conhecidas apenas até o período que está sendo realizado o ensaio. Este tipo de ensaio censurado começa quando algumas unidades são removidas do teste antes de falharem, continuam operando depois do período de análise, ou são removidas do teste ou serviço porque falharam devido a uma causa diferente da simulada no teste.

Similarmente, um ensaio é chamado de ensaio censurado pela esquerda quando o tempo de falha é conhecido apenas por ser anterior a um determinado modo de falha.

Se as unidades que não falharam têm um tempo de vida similar e todos os tempos de falha são anteriores a este, este ensaio é chamado de ensaio censurado simples pela direita. (Nelson, 1990).

Usualmente, nos estudos de confiabilidade, são incluídas todas as falhas de um sistema ou equipamento e visam obter “a capacidade de um sistema ou equipamento que está operando durante um determinado

período sob determinadas circunstâncias”. Sendo assim, pode-se entender que o que se busca são métodos quantitativos de análise.

No entanto, em muitos casos, uma análise qualitativa já é capaz de avaliar a confiabilidade de um equipamento, principalmente naqueles chamados de reparáveis, que são equipamentos onde se prevê ajustes, limpeza e substituição de componentes ao longo de sua vida útil. Desta forma, prevê-se manutenção como item fundamental para que estes equipamentos operem durante o tempo esperado. Outra abordagem é a de se aumentar a vida útil de equipamentos, principalmente aos submetidos a condições severas de operação, ou seja, que operam em ambientes insalubres, com sobrecarga controlada, entre outros.

Todo equipamento é projetado segundo uma especificação, ou seja, todo equipamento é projetado segundo a função básica que irá desempenhar. A manutenção é capaz de restaurar o desempenho do equipamento se o mesmo não for o desejado, no entanto, não aumenta o seu desempenho acima do original.

Para Leitch (1995), atividades que asseguram a manutenibilidade de um equipamento são diferentes daquelas que asseguram a confiabilidade, “manutenibilidade é a probabilidade que um equipamento ser restaurado ao seu estado de funcional, em um determinado tempo e ambiente”, ou seja, é o estudo dos tempos de reparo.

O conceito de disponibilidade surge neste ponto, sendo definido como sendo o tempo que equipamento, sistema ou instalação está disponível para operar ou em condições de produzir.

Uma das ferramentas que permite avaliar ações que aumentem a confiabilidade e a disponibilidade é a Análise de Modos e Efeitos de Falha ou FMEA (“Failure Mode and Effect Analysis”).

Basicamente, a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) parte da definição das funções dos sistemas e subsistemas analisados, verificando em seguida as falhas que afetam cada função e os principais modos de falha que levam a cada falha. Para cada modo de falha, analisam-se os defeitos e defini-se a necessidade de ações para reduzir a possibilidade de ocorrência deste evento, eliminá-lo ou, simplesmente controlar os efeitos indesejáveis.

O FMEA é um sistema lógico que hierarquiza as falhas potenciais e fornece as recomendações para as ações preventivas. É um processo formal que utiliza especialistas dedicados a analisar as falhas e solucioná-las (Pinto, Xavier; 2005).

A análise de modos e efeitos de falha surgiu como metodologia formal nos anos 60, quando a demanda por segurança e confiabilidade se estendeu do estudo das falhas de componentes para incluir os efeitos das falhas no sistema dos quais os componentes faziam parte.

Uma das primeiras descrições de uma apresentação formal aplicando os conceitos de FMEA foi executada por J.S. Coutinho da Academia de Ciências de Nova York em 1964.

A Military Standard MIL – Std 1629 “Procedures for Performing a Failure mode, Effect and Criticality Analyses” que de uma forma livre pode ser traduzido como: “Procedimentos para execução de um modo de falha, efeitos e análise de criticidade” foi publicada em 1974, e depois de várias revisões, definiu a forma básica para se analisar um sistema e seus modos de falha.

Em 1988, a Ford Motor Company publicou “Potential Failure Mode and Effect analysis in Design” (FMECA de projeto) e “For Manufacturing and Assembly Processes” (FMECA de processo). Estes manuais apresentam a metodologia de análise de modo e efeito de falha para o processo produtivo tanto quanto para o projeto do produto.

Estes processos focados nas necessidades particulares da indústria automobilística e, com a força das maiores fabricantes de automóveis e seus fornecedores, desenvolveu uma norma denominada SAE J1739, “Práticas recomendadas SAE de veículos de superfície” instituída pela SAE em 1994.

Dois tipos de FMEA surgiram desde seu desenvolvimento: o FMEA de projeto e o FMEA de processo.

A diferença do FMEA de projeto e de processo está nos objetivos: o primeiro atua durante o projeto do produto e por isso deve prever as falhas e modos de falha possíveis, para com isso se corrigir ou retrabalhar o produto antes da produção, levando em consideração todos os aspectos, desde manutenibilidade até aspectos ligados a segurança. Segundo Nelson et al (1989), estudos da confiabilidade e do comportamento de um equipamento durante o projeto podem identificar os pontos fracos e de potenciais falhas. Com este conhecimento, o projetista pode criar alternativas e implantar mudanças no projeto antes que o equipamento entre em produção e sejam necessárias mudanças de ferramentas e processos. Se as deficiências não forem sanadas antes do equipamento ser lançado, o número de alternativas do projeto economicamente viáveis é reduzido e as mudanças se tornam muito mais custosas. No entanto, quanto mais cedo estas deficiências forem identificadas e corrigidas, mais barato e eficiente será o equipamento.

Já o FMEA de processo, onde o produto já está definido, focaliza em como o equipamento ou linha é mantido em operação. Sendo assim, as falhas e modos de falhas têm ligação com o funcionamento, instalação e operação do produto.

Pinto et al (2005) ressalta o fato de a manutenção estar ligada principalmente ao FMEA de processo, pois é nesta fase que os equipamentos estão instalados e estão operando. Esta aplicação se torna mais vantajosa com a análise das falhas já ocorridas, devido à economia de tempo e objetividade na seleção e priorização das falhas.

Garcia et al (2005) aponta a importância do FMEA para direcionar a manutenção e identificar as formas mais eficientes de operação e levantar as ações mais recomendadas para aqueles pontos com altos potenciais de danos.

Segundo Cardoso (2000), o FMEA tem como uma de suas deficiências considerar o avanço dos modos de falha isoladamente, não sendo possível avaliar os efeitos para a combinação de diversos modos de falha ocorrendo simultaneamente. Ainda a ocorrência de um determinado modo de falha pode afetar negativamente o desempenho do sistema que, ocorrendo com outros modos de falha, podem amplificar seus efeitos, especialmente se os modos de falha são interdependentes.

De forma similar, Freitas et al (1997) nota que FMEA é restrito quando considera as falhas simultâneas do produto (ou processo), não fornecendo elementos para quantificação da confiabilidade do produto (processo).

Em muitos casos, o FMEA é expresso utilizando-se termos como possível, provável, importante entre outros, pois é muito difícil determinar precisamente os eventos em estudo. Perda de rendimento é o caso onde geralmente se usa comparações qualitativas (Xu et al, 2002).

A análise tipo FMEA manipula conceitos nem sempre usuais como taxas de falhas associadas a um modo de falha específico, sua execução sempre demanda tempo e conhecimento sobre o equipamento (processo), embora sua aplicação possa ser simplificada com o uso de ferramentas computacionais.

Como método, o FMEA tem diretrizes gerais as quais norteiam sua elaboração. Desta forma, é necessário refletir sobre cinco questões a respeito do sistema (equipamento) como base para elaboração do FMEA (Cardoso, 2004), a saber:

- Como cada componente do sistema pode falhar (quais seus modos de falha)?
Desta forma modo de falha pode ser entendido como o conjunto de fatores e solicitações as quais um equipamento esta sujeito durante a sua operação, que o levam a atingir o fim de sua vida útil ou é o mecanismo pelo qual um item falha (Cardoso, 2004).
- Quais os efeitos destas falhas sobre o sistema?
Neste item também se deve responder:
 - Qual a evidência, se existe alguma, de que ocorreu uma falha?
 - De que modo ela é uma ameaça (se existe algum) à segurança ou ao meio ambiente?

- Como ela (falha) afeta (se afeta) a produção e operação?
- Qual o dano físico causado pela falha (se é causado algum)?
- Quão críticos são estes efeitos?
- Como detectar a falha?
- Quais as medidas contra estas falhas (evitar, prevenir a ocorrência das mesmas ou minimizar seus efeitos)?

A análise por meio da metodologia de FMEA baseia-se na execução de uma tabela, a qual apresenta um número mínimo de informações para a execução de um estudo adequado.

A indústria aeroespacial adota o FMEA como técnica de análise de problemas antes que as aeronaves sejam construídas e utilizadas. Deste modo, se está analisando o futuro e buscando determinar falhas potenciais. No entanto, este procedimento tem como desvantagem o emprego de grande quantidade de homem/hora. Uma forma de minimizar este fato é o uso de formulários e construir o FMEA com um histórico das falhas já ocorridas. A análise de falhas já ocorridas apresenta um enorme potencial de ganho com o uso desta ferramenta. Deve-se acrescentar que isto não representa um desvio da filosofia básica da ferramenta mais sim uma adaptação bastante interessante para a área de manutenção.

Conceituação

Sendo a confiabilidade expressa como uma função estatística, algumas curvas utilizadas para descrever o comportamento de um equipamento ao longo do tempo são apresentadas a seguir.

A distribuição acumulada é utilizada para se ter uma estimativa da proporção total de itens que falham ao longo do tempo, até a falha do último item. A função confiabilidade demonstra a probabilidade acumulada da ocorrência de sobreviventes (equipamentos que não falharam) e a função taxa de falha representa:

- A proporção de sobreviventes, em um momento de tempo, de uma grande população inicial que falha no próximo intervalo de tempo ou;
- A proporção esperada de sobreviventes de uma amostra que falha no próximo intervalo de tempo; ou;
- A probabilidade que um item individual que sobreviveu até o momento e irá falhar durante o próximo intervalo de tempo.

A curva que representa a taxa de falha de um equipamento em função do tempo é também conhecida como curva da banheira devido ao seu formato (vide Fig.01). Esta curva representa o comportamento, ao longo da sua vida útil, de vários dispositivos elétricos, mecânicos e sistemas, sendo determinada a partir de estudos estatísticos.

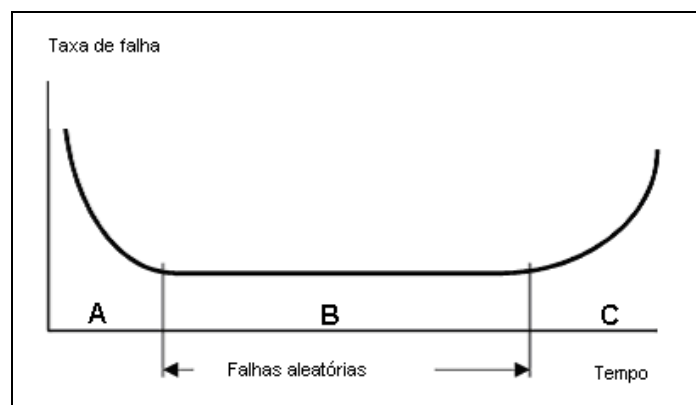


Figura 01 – Curva da banheira.

A curva da banheira apresenta três períodos distintos:

- Mortalidade infantil: Há grande incidência de componentes com defeito de fabricação, erro de projeto, erro de aplicação ou erro de instalação. A taxa de falha decai com o tempo.
- Aleatória: A taxa de falha é sensivelmente menor e relativamente constante ao longo do tempo. A ocorrência de falhas advém de fatores menos controláveis, como fadiga por sobrecarga ou corrosão acelerada devido à interação dos materiais com o meio. Este tipo de falha se caracteriza pela dificuldade de predição/prevenção.
- Envelhecimento ou degradação: Há um aumento da taxa de falha decorrente do desgaste natural (atrato, corrosão), que será tanto maior quanto mais passa o tempo.

Esta curva foi considerada por muito tempo como um padrão para o comportamento de equipamentos e sistemas. Porém, a partir dos estudos elaborados pela Federal Aviation Administration nos anos 60 e da possibilidade de uma boa atuação nas fases que antecedem a entrada em operação dos equipamentos (projeto, desenvolvimento), já não pode ser considerada como tal.

Existem diversas distribuições de probabilidade e elas são utilizadas na modelagem do comportamento das funções confiabilidade, densidade de probabilidade dos tempos de falha e da função probabilidade ao longo do ciclo de vida de um produto. As principais distribuições de confiabilidade são a normal, lognormal, exponencial e de Weibull.

A distribuição normal também conhecida como Gaussiana, é segundo O'Connor (2002) e Carter (1986), a mais amplamente utilizada, isto porque materiais naturais, fenômenos biológicos têm um comportamento que pode ser representado por esta distribuição.

Para Lewis (1987), esta distribuição representa equipamentos que sofrem desgaste crescente, de forma que a taxa de falha apresenta uma curva crescente em função do tempo. Esta distribuição pode ser verificada quando se observa o comportamento da vida de ferramentas de corte durante a usinagem.

A forma geral da distribuição normal (vide fig. 02), suas propriedades e aplicações são muito bem cobertas em diversas referências relacionadas com os conceitos de estatística (Carter, 1986).

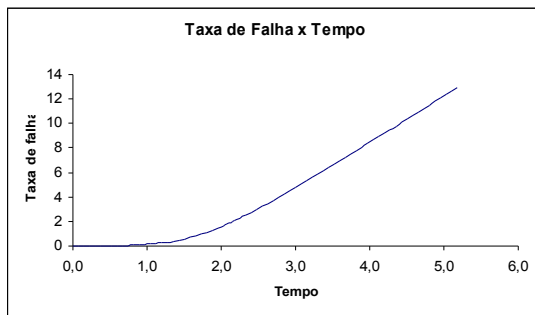


Figura 2 – Função Taxa de Falha da distribuição normal.

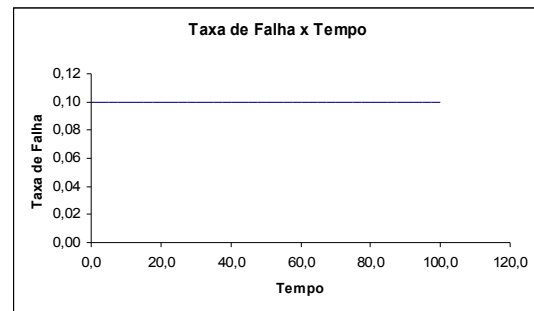


Figura 3 – Função Taxa de Falha da distribuição exponencial.

A distribuição exponencial (vide Fig. 03) representa uma situação onde a taxa de falha é constante.

Esta distribuição representa a faixa das falhas aleatórias da curva da banheira (vide Fig. 1), pois apresenta uma taxa de falha constante.

Segundo Alkaim apud Smith (2003), durante a vida de uma aeronave os rolamentos seguem esta distribuição de taxa de falhas.

Em seu livro Carter (1987) considera que o comportamento de equipamentos (componentes) eletrônicos segue esta distribuição ao longo da vida.

A distribuição lognormal(vide Fig. 04) é bastante utilizada para caracterizar o tempo de vida de produtos e materiais. A distribuição lognormal é a que melhor descreve o tempo de vida de componentes semicondutores cujos mecanismos de falha envolvem interações químicas, como as encontradas em processos de corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, degradação de contatos, sendo também adequada para mecanismos de fadiga em materiais (Freitas, Colossimo; 1997). Para Carter (1987) esta distribuição é a que melhor define o comportamento de equipamentos mecânicos sobre a ação de fadiga.

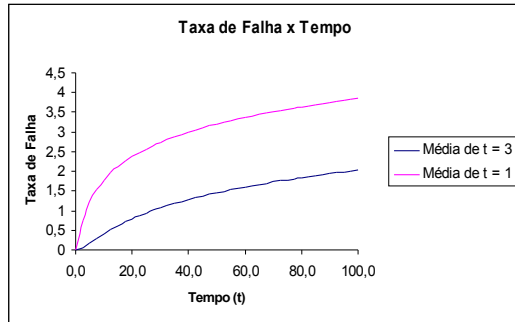


Figura 4 – Função Taxa de Falha da distribuição Lognormal.

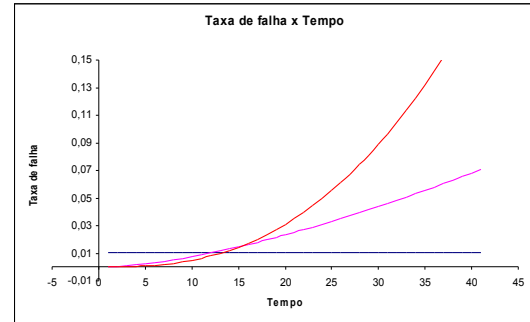


Figura 5 – Taxa de falha da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.

A distribuição de Weibull (vide Fig. 05) foi proposta originalmente por W. Weibull (1951) em estudos relacionados ao tempo de falha devido à fadiga em metais. Ela é frequentemente empregada para descrever o tempo de vida de produtos industriais. Ela também descreve adequadamente o tempo de vida de produtos formados de várias partes (elementos) cuja falha ocorre quando a primeira parte falhar. Outra vantagem da aplicação da distribuição de Weibull em aplicações práticas deve-se ao fato de ela apresentar uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a função taxa de falha é monótona. Isto significa que ela pode ser crescente, decrescente ou constante. Ela descreve adequadamente a vida de mancais, componentes eletrônicos, cerâmicas, capacitores dielétricos, etc. (Freitas, Colossimo; 1997).

Para Carter (1986), a distribuição de Weibull “é muito desejável, pois se tem em mãos uma distribuição que pode representar qualquer curva de taxa de falha no tempo”.

Na Fig. 05 deve-se ressaltar que o parâmetro β é denominado constante de forma, que primariamente controla a forma da curva na distribuição de Weibull.

Desenvolvimento

Para melhor apresentar o estudo de confiabilidade de compressores alternativos foi aplicado o FMEA para estes equipamentos, tendo como objetivo o estudo deste componente do sistema de refrigeração, de forma que se crie um banco de dados dos principais modos de falha destes equipamentos, suas causas e efeitos. Junto com esta informação podem ser sugeridas medidas a serem adotadas no caso de uma manutenção preventiva (na forma de inspeção) ou preditiva. Esta análise indicará dados que podem ser monitorados e ações que podem, se o modo de falha for identificado no início, evitar sua propagação e minimizar seus efeitos.

Este FMEA foi construído com base em informações coletadas na bibliografia disponível. A base de dados onde se dispunha da ocorrência de diversos modos de falha dos compressores alternativos foi adquirida por meio da análise de relatórios de manutenção de uma empresa do setor de refrigeração. A análise desta base de dados permitiu avaliar os principais modos de falha dos compressores semi-herméticos durante a sua operação.

Entre a bibliografia citada vale ressaltar os trabalhos de Copeland (2004) e Silva (2004) que foram os mais completos encontrados. No entanto, deve-se observar que trabalhos como o de Breuker et al (1998), no qual é realizado um estudo de aplicação de sistemas de monitoramento de ciclos de compressão com

compressores alternativos, permitiu ampliar o escopo dos aspectos a serem analisados e que estão relacionados ao monitoramento de falhas em compressores de uma forma geral.

Os trabalhos de Jourdan (2004), Gauge (2003), Tomezyk (2003B), Schaub (2001), Ar conditioning, heating e refrigeration news (2000) indicam características e efeitos de alguns dos modos de falha, como discutido no capítulo dois. Estes trabalhos abordam alguns modos de falha e indicam medidas para minimizar ou corrigir seus efeitos.

Para facilitar o preenchimento da coluna da severidade, foi atribuído um conceito conforme a Tab. 1.

Tabela 1 - Índices de severidade de modo de falha.

Índice	Conceito
1	Falha de menor importância, o efeito quase não é percebido.
2 a 3	Provoca redução de desempenho e surgimento gradual de ineficiência
4 a 5	O equipamento sofrerá degradação progressiva, ineficiência moderada, queda de rendimento (problemas para cumprir sua função).
6 a 8	O equipamento não desempenha sua função, baixa eficiência.
9 a 10	Falhas catastróficas (Interrupção do sistema) e podem ocasionar danos a bens e pessoas

Esta tabela foi criada como uma simplificação da norma MIL-STD-1629A, para facilitar a consulta e aplicação dos índices de severidade, pois uma das características dos modos de falhas de compressores alternativos e sua ação gradual e crescente ao longo da vida do equipamento.

Para demonstrar o uso da ferramenta a Tabela 2 foi construída para o modo de falha conhecido como “Retorno de fluido refrigerante líquido”.

Tabela 2 – FMEA Retorno de fluido refrigerante no estado líquido.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Proximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	<ul style="list-style-type: none"> Aspirar uma determinada quantidade de fluido refrigerante gasoso do evaporador e o comprimir a uma pressão mais elevada, de tal forma que o gás se liquefaz no condensador, permitindo desta forma que com a evaporação do fluido ele absorva energia (calor) e o rejeite na condensação. Sistema deve ser selado (contaminação do meio ambiente). Seguro (operador). Eficiente (consumo de energia). 	<p><i>Retorno de fluido refrigerante líquido:</i> É uma das falhas mais comuns que encontramos nos compressores que sofrem quebra mecânica e ocorre com o compressor em operação em que o refrigerante líquido se mistura com o lubrificante alterando sua capacidade de lubrificação. Esta falha se caracteriza principalmente quando o superaquecimento do gás na admissão do compressor está baixo permitindo que o fluido que deveria estar totalmente evaporado ainda apresenta líquido na entrada do compressor na sucção. Devido ao efeito detergente do refrigerante, ele é capaz de remover todo o filme de lubrificação nas partes móveis do compressor. Consequentemente provocará o contato de metal contra metal, gerando desgaste e quebra mecânica, cuja característica é que este desgaste se manifestará de forma progressiva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Válvula de expansão superdimensionada; Perda de eficiência da evaporadora; Má distribuição de ar na face da serpentina do evaporador. Excesso de fluido refrigerante no sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> Remoção do filme de lubrificação das partes móveis do compressor, gerando desgaste progressivo e consequentemente quebra. Partida inundada; Golpe de líquido. 	<ul style="list-style-type: none"> Ineficiência progressiva do sistema até a quebra 	<ul style="list-style-type: none"> Formação de gelo na sucção do compressor; Vibração e ruído anormais; Aumento do consumo elétrico; Ineficiência térmica (sujeito a mércia do sistema); Parada do sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> Medição da amperagem consumida pelo compressor; Queda de temperatura na sucção do compressor; Verificar o superaquecimento total, próximo à válvula de serviço de sucção do compressor; Verificação de formação de gelo no evaporador; Verificar se existe retorno de refrigerante líquido em condições de baixa carga térmica (durante a noite, por exemplo). 	7	<ul style="list-style-type: none"> Recalibração ou substituição do elemento de expansão; Limpeza da evaporadora; Verificação dos ventiladores do evaporador; Instalação de um reservatório de sucção para o compressor; Retirada do excesso de refrigerante; Ajuste do sistema de controle;

Para se obter uma estimativa do comportamento da confiabilidade de compressores alternativos, serão analisados dados coletados de campo durante o período de um ano de vida destes componentes. Entre os componentes observados, foram separados alguns que apresentavam uma boa relação de unidades produzidas com a quantidade de falhas.

Sendo os compressores equipamentos eletro mecânicos com vários componentes, os quais podem falhar de forma independente e afetar todo o equipamento, as distribuições selecionadas para se efetuar o teste foram as distribuições de Weibull e lognormal (vide as distribuições de confiabilidade).

As demais distribuições, normal e exponencial, não se adequam para equipamentos onde a taxa de falha pode ser decrescente ou não com o tempo. A distribuição normal apresenta uma taxa de falha sempre crescente no tempo e a exponencial a taxa de falha é constante no tempo.

A execução do teste foi feita no programa de confiabilidade de equipamentos “Reliasoft Weibull ++”, para facilitar a análise.

O software Weibull++ da Reliasoft foi desenvolvido para realizar a análise de dados de vida (Análise de Weibull) utilizando diversas distribuições de vida para análises paramétricas, incluindo a distribuição Weibull com 1, 2 e 3 parâmetros, a Weibull mista, gama generalizada, lognormal, exponencial e normal bem como modos de falhas competitivos para todas as combinações destas distribuições.

Como os testes realizados para obter as medidas de durabilidade de produtos são demorados e caros, pode-se optar por fazer uma análise de dados coletados em campo. No entanto, alguns equipamentos duram relativamente muito tempo, no caso de compressores de sistemas de refrigeração temos uma vida estimada em 20 anos.

Assim optou-se por fazer testes censurados pela direita, onde as vidas úteis dos equipamentos são conhecidas apenas até o período que está sendo realizado o ensaio, definindo-se os dados observados de um ano de funcionamento a partir da fabricação.

A razão deste tipo de teste é que, mesmo sendo incompletas, as informações censuradas nos fornecem informações sobre o tempo de vida dos produtos.

Os equipamentos selecionados foram separados e organizados conforme apresentado na Tab.3.

Tabela 3 – Dados de entrada do programa de confiabilidade.

Modelo	mês de fabricação	unidades fabricadas neste mês	mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	3	12																1									
	4	12								1			1			1	1										
	6	13											1														
	8	20													1												
	9	20															1										

Os itens sobreviventes foram separados dos demais em função do mês de fabricação do compressor e do mês em que ocorreu a falha.

Os dados utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram dados coletados em campo, onde não se possui controle de todas as variáveis do teste de confiabilidade. Dessa forma, muitos dos valores são estimados conforme algumas características do equipamento.

Para compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração pode-se citar:

- O tempo de operação dos compressores é estimado em dezoito a vinte horas por dia. Valores como o número de partidas por hora dos compressores são avaliados de forma qualitativa em virtude das características do equipamento.
- Muitos dos dados de operação e da instalação dos compressores não são conhecidos, portanto erros como falta de ventilação são novamente estimados. Os compressores possuem diversos equipamentos de segurança (que podem ser “desarmados”, ou seja, desligados rapidamente, nos casos de baixas e

altas pressões ou alguns problemas elétricos), todavia os mesmos podem ser burlados pelos usuários acarretando em danos desnecessários.

Neste ponto serão abordados alguns aspectos construtivos de cada modelo como: tipo (compacto, normal), potência, diâmetro do pistão, curso do cilindro, sendo analisado também a aplicação e, principalmente, os modos de falha verificados para cada modelo (vide Tab. 4) para seleção da distribuição de confiabilidade mais adequada.

Tabela 4 – Características físicas e de aplicação dos compressores.

Modelo	OBS/ Tipo	Aplicação	bloco	Potência (W)	Número de cilindros	Curso do pistão (mm)	Diâmetro do pistão (mm)
A	COMPACTO	CONGELADOS	B1	4557	4	55,0	39,30
B	COMPACTO	CONGELADOS	B2	3822	4	50,0	39,30
C	COMPACTO	ALTAS E MÉDIAS	B2	5292	4	50,0	39,30
D	NORMAL	ALTAS E MÉDIAS	B3	22197	4	75,0	55,00
E	NORMAL	CONGELADOS	B4	7497	4	65,0	42,00
F	NORMAL	ALTAS E MÉDIAS	B4	11172	4	65,0	42,00
G	NORMAL	ALTAS E MÉDIAS	B3	29547	6	75,0	55,00

Nota-se na Tab. 4 que, pelas características do projeto, os compressores podem ser divididos em um primeiro grupo com a seguinte divisão: compactos e normais. O segundo grupo seria relacionado à aplicação, também com duas categorias: congelados e altas e médias temperaturas.

Cruzando as informações dos dois grupos, os compressores podem ser reunidos conforme suas características. Dessa forma, os compressores A e B são compactos e aplicados para congelados, compressor C como compacto para altas e médias temperaturas, compressores D, F e G são normais para altas e médias temperaturas e o compressor E como normal para congelados.

Os compressores podem ser classificados por tipo de bloco, ou seja, eles podem ser separados conforme suas características construtivas, podendo ser divididos em famílias (as características destas famílias podem ser vistas na Tab. 4).

Estas famílias possuem pistões, cursos (dos pistões) e cabeçote semelhantes, podendo apresentar motores (potências) e número de pistões distintos. Este último aspecto influencia diretamente na capacidade do compressor (vazão e potência), mas não necessariamente na sua utilização (sistemas de ar condicionado, câmaras frigoríficas, balcões refrigerados).

Compressores geometricamente semelhantes que se diferem apenas pela potência, têm aplicações distintas. Equipamentos usados para congelados têm um funcionamento mais uniforme e funcionam mais horas por dia que os de altas e médias temperaturas, que apresentam um funcionamento mais intermitente obrigando o compressor a executar um maior número de partidas por hora, devido a isso, eles apresentam motores elétricos de maior potência para compensar esse aspecto da operação. Os compressores de congelados trabalham com fluido refrigerante mais rarefeito, obrigando em muitos casos os usos de ventilação extra (ventiladores de cabeçote), e o fluido refrigerante não é usado para a refrigeração do motor elétrico (não circulando entorno do mesmo).

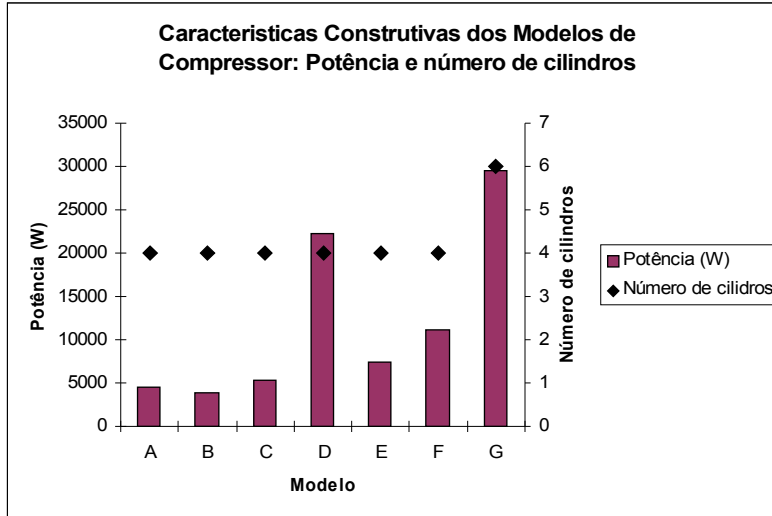


Figura 6 – Características construtivas/ potência e numero de cilindros dos compressores.

Na Fig. 6, pode-se verificar a variação do número de cilindros e potência para os diversos modelos. Os compressores, apesar de diferentes em potência e geometria (volume deslocado de fluido refrigerante), podem ser semelhantes em aplicação (exemplo dos modelos D e G), enquanto que compressores com mesmo volume deslocado (B e C), podem apresentar aplicações distintas e como consequência diferentes potências.

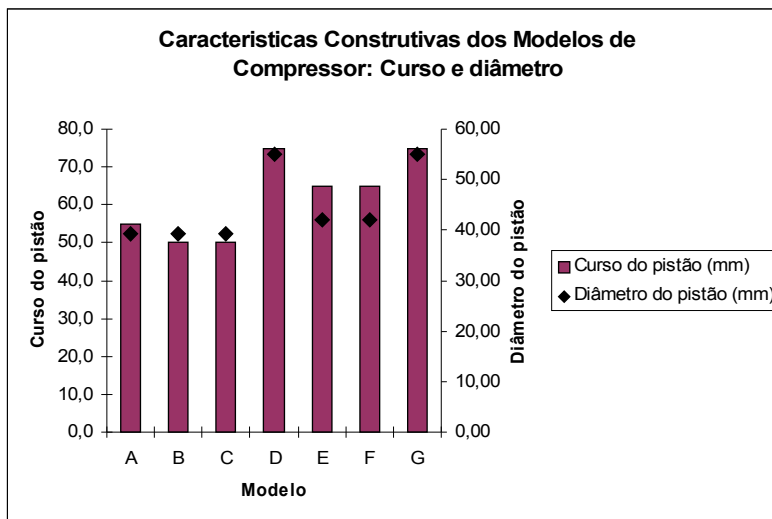


Figura 7 – Características construtivas/ potência e numero de cilindros dos compressores.

A Fig. 7 demonstra que compressores distintos podem apresentar geometria semelhante como os modelos A e B, C ou como, os modelos E e F. Já os compressores D e G, do ponto de vista de volume unitário (de cada cilindro) e aplicação, são iguais. Porém verifica-se na Fig. 8 que quando há aumento de potência do modelo G, nota-se que este é proporcionalmente igual ao aumento da vazão devido ao seu maior número de cilindros.

Agrupando as informações dos Fig. 6 e 7, pode-se separar os compressores em função de sua razão de compressão. Desta forma consegue-se unir a informação contida nos três gráficos. Isso pode ser realizado pelo volume deslocado e pelas características geométricas do projeto, com base no tamanho do cabeçote utilizado em determinado modelo.

Agrupando-se os compressores pela razão de compressão tem-se o grupo 1 formado pelo compressor de modelo A, o grupo 2 com B e C, o grupo 3 com D e G e o grupo 4 com os E e F. Nestas condições os compressores se caracterizam por geometria e aplicação distintas.

Antes de se abordar os modos de falhas para a nova forma de agrupamento, será analisada a sua ocorrência ao longo do período de garantia estudado. Nota-se aqui que os modos de falhas apresentam uma distribuição próxima da média ao longo do período (abordando-se o conjunto), com maior concentração no segundo período. Todavia quando se considera um compressor de cada vez, pode ser observado que nenhum deles apresenta valores semelhantes.

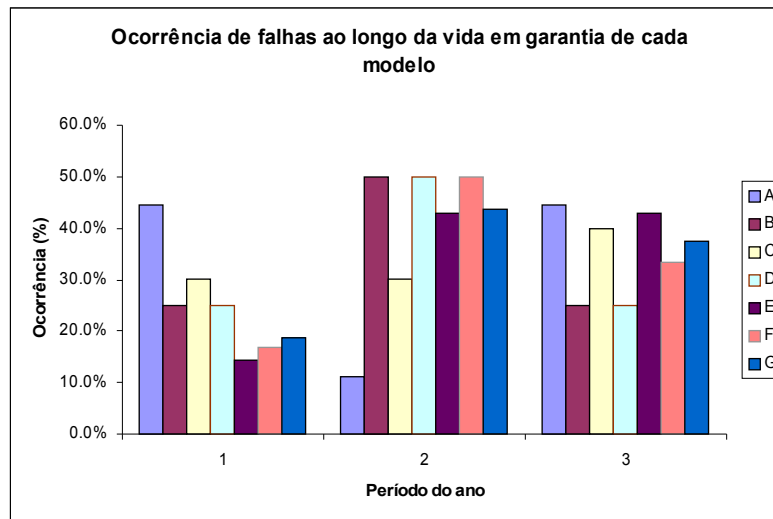


Figura 8 – Ocorrência de falhas ao longo da vida em garantia de cada modelo de compressor.

Depois de se apresentar os modos de falha que agiram em cada modelo de compressor deste estudo, algumas simplificações podem ser efetuadas.

Os modos de falha com origem em contaminação foram agrupados. Sua origem provável foi a própria instalação do equipamento. Uma alternativa seria contaminação durante uma manutenção, pouco provável dada à idade do equipamento. O efeito final verificado pelas diferentes formas de contaminação pode ser entendido como um desgaste contínuo até uma falha catastrófica. Outro modo de falha que foi agrupado é o Golpe de Líquido.

O efeito dos modos de falhas, pode ser dividido em: desgaste para modos de falha de ação menos agressiva e desgaste mais acentuado, fadiga para modos de falha de efeito intermediário e de maior progressividade, sobrecarga no caso específico do golpe de líquido que é um comportamento distinto dos demais. Os problemas elétricos foram definidos como aleatórios principalmente por serem independentes do equipamento. Eles podem ser originados por fornecimento da rede de baixa qualidade ou tem origem no erro humano. Deve-se notar que dados como o mês de fabricação não são considerados na análise, pois, a produção dos compressores não é constante ao longo do ano.

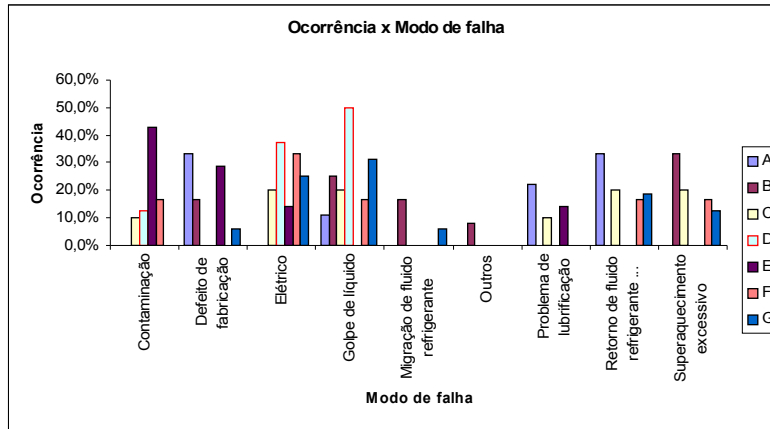


Figura 9 – Ocorrência dos modos de falha dos compressores.

Modos de falhas como defeito de fabricação, contaminação, perda de lubrificação e superaquecimento excessivo, foram considerados causadores de um desgaste menos agressivo. Modos de falhas elétricos, como já discutido anteriormente, são considerados aleatórios. Os efeitos do retorno de fluido refrigerante no estado líquido e da migração de fluido refrigerante são considerados como fadiga ou um desgaste mais agressivo. O golpe de líquido foi considerado gerador de sobrecarga mecânica do compressor e os demais modos de falhas que não puderam ser englobados foram desconsiderados. Com base nestas considerações, foi obtida a Fig. 10.

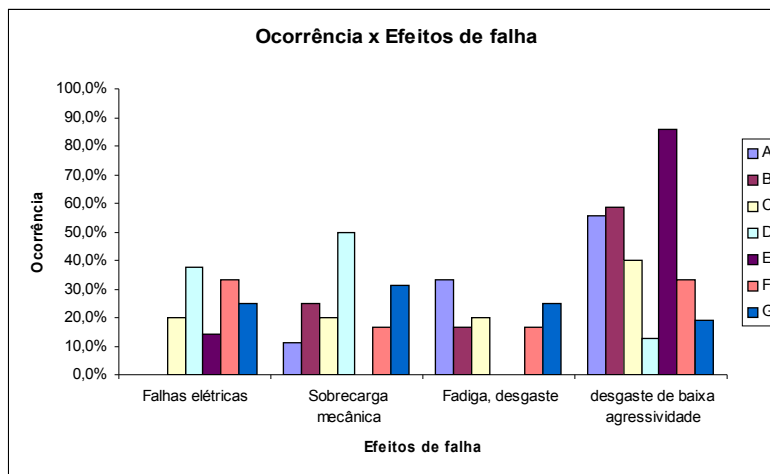


Figura 10 – Ocorrência dos efeitos de falha dos compressores.

Com a informação dos efeitos dos modos de falhas, pode-se iniciar a seleção da distribuição mais adequada para o comportamento destes efeitos para cada compressor. Neste sentido, a distribuição lognormal é a que melhor descreve equipamentos mecânicos sujeitos a fadiga, pois a mesma foi criada para esse fim.

O desgaste é melhor representado pela distribuição normal, mas tanto a distribuição lognormal quanto a de Weibull, conseguem assumir a forma desta distribuição satisfatoriamente.

Os problemas elétricos abordados como aleatórios são melhor descritos pela distribuição exponencial, que pode ser representada fielmente pela distribuição de Weibull. O mesmo pode ser dito pela ocorrência de sobrecarga, que indica uma taxa de falha decrescente (quando ocorre apenas este efeito) e, é satisfatoriamente representada por essa distribuição.

A escolha da curva mais adequada para cada modelo de compressor é apresentada nos próximos parágrafos.

Os compressores D e G apresentam semelhanças em quase todos os fatores (razão de compressão, proporcionalidade na potência e aplicações), apenas divergindo em sua construção (Fig. 6 e 7). A ocorrência dos seus modos de falhas são similares (nos modos de falha com maior semelhança) (Fig. 9 e 10), apresentando apenas pouca distinção pelo fato do compressor D sofrer contaminação e o G, retorno de fluido refrigerante no estado líquido e migração de fluido refrigerante, fatos que podem ser facilmente notados nas curvas de confiabilidade e taxa de falha. O compressor D apresenta maior confiabilidade e menor taxa de falha, também explicado, pois a contaminação tem efeito menos agressivo que os outros dois modos de falhas (Fig. 10).

Os compressores E e C são os que apresentaram as curvas de confiabilidade da taxa de falhas com comportamento mais próximo entre si (Fig. 11 e 12). Dos parâmetros analisados, os dois apresentam a maior semelhança em relação aos modos de falhas (Fig. 9 e 10), sendo que os demais compressores apenas possuem em comum a aplicação, divergindo nos outros pontos (Tab. 4).

O compressor A apresenta a distribuição lognormal (Fig. 11 e 12) e não pode ser comparado aos demais, principalmente pelo fato dos seus modos de falhas dominantes serem devido à migração de fluido refrigerante (fato apenas verificado neste compressor) (Fig. 9). Seu comportamento está mais próximo a dos compressores D e G. Isto pode ser explicado inicialmente pois estes compressores tem o mesmo tipo de aplicação (altas e médias temperaturas de evaporação) (Tab. 4). Por isso, todos trabalham com fluido refrigerante mais denso (principalmente com o modelo G), cujos modos de falhas tem como efeito dominante a fadiga. Este modelo de compressor teve um comportamento da taxa de falha que pode ser entendido como mortalidade infantil na curva da banheira (vide Fig. 1). Isto se deveu ao fato que este compressor apresentou uma ocorrência de elevado número de golpes de líquido no período inicial abrangido pelo estudo.

Os compressores B e F não se assemelham em nenhum parâmetro estudado, tendo em comum apenas o fato de ambos sofrerem os efeitos de modos de falhas de forma bem distribuída ao longo do ano (Fig. 8), ou seja, com comportamento próximo do aleatório ou randômico. Esse efeito é facilmente notado no compressor F, que apresenta elevada ocorrência de modos de falha elétricos (Fig. 10), que podem ser explicados no compressor B pelo fato de seus modos de falha dominantes serem totalmente opostos. Ele apresenta elevada ocorrência de superaquecimento excessivo, gerando desgaste moderado e golpe de líquido que possui efeito agressivo de sobrecarga (Fig. 10).

A menor taxa de falha apresentada por estes compressores (Fig. 12) pode ser explicada pela elevada ocorrência de desgastes e destes modos de falhas conhecidos como aleatórios (Fig. 10). Enquanto, a maior taxa de falha (Fig. 12) pertence aos compressores D e G, que apresentam elevados valores de ocorrências de sobrecarga (golpe de líquido) e baixos valores de ocorrências de modos de falha que geram desgaste moderado ou leve (Fig. 10).

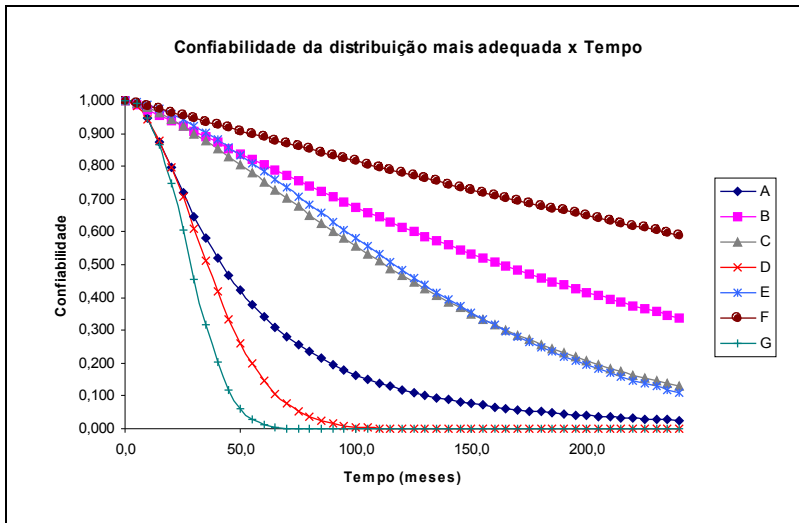


Figura 11 – Curvas de confiabilidade selecionadas dos compressores.

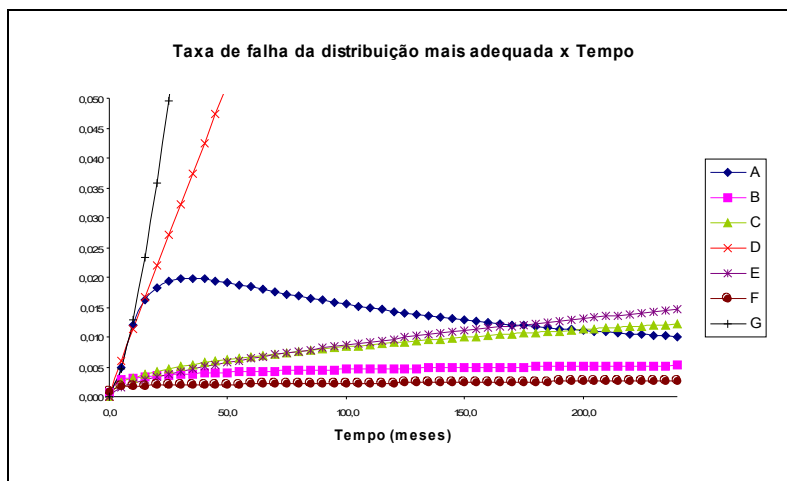


Figura 12 – Curvas de taxa de falha selecionadas dos compressores.

Conclusão

Existem diversos trabalhos envolvendo a confiabilidade para equipamentos eletro-eletrônicos, no entanto equipamentos mecânicos no geral são complexos e difíceis de serem modelados. Sendo assim se possui pouca informação disponível e organizada para uma metodologia de análise.

Com a realização do estudo da confiabilidade deste tipo de compressor no seu período de garantia, onde se vincula as características construtivas e aplicação do compressor, verificou-se que o comportamento de parâmetros que envolvem a aplicação do compressor e os seus modos de falha são melhor descritos ou representados pela curva de taxa de falha. Já a curva de confiabilidade descreveu melhor as divisões baseadas nas características construtivas principalmente a razão de compressão dos compressores.

As curvas de confiabilidade também demonstram que, em muitos casos, os compressores dificilmente atingiram a vida estimada em projeto sem o uso da manutenção.

Com estas análises, espera-se poder complementar a informação sobre o comportamento deste equipamento e de suas características de operação no mercado brasileiro.

Bibliografia

1. Alkaim, L; Metodologia para incorporar conhecimento intensivo às tarefas de Manutenção Centrada na Confiabilidade aplicada em ativos de sistemas elétricos. Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção. Brasil 2003.
2. Ar conditioning, heating e refrigeration news. Your compressor's worst nightmare, ABI/INFORM Global, 2000.
3. ASHRAE Handbook Fundamentals. Principles of heating, ventilating, and air conditioning: a textbook with design data based on the 2001 ASHRAE handbook Fundamentals. Harry J. Sauer, Jr., Ronald H. Howell, William J. Coad: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2001.
4. Beuker, M.S.; Braun J.E.; Common faults and their impacts for rooftop air conditioners. EUA 1998.
5. Bowles, J. B.; New SAE FMECA standard. Source: Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim, CA, USA, 1998.
6. Braun, James E. - Automated fault detection and diagnostics for vapor compression cooling equipment. Transactions of ASME, ASME 2003.
7. Bressan, G.; Modelagem e simulação de sistemas computacionais. LARC-PCS/EPUSP, 2002.
8. Cardoso, I.A.P. Elaboração de políticas de manutenção uma abordagem voltada à análise de confiabilidade. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em engenharia.
9. Cardoso, I.A.P. e Souza, G. F. M.; Manutenção baseada em confiabilidade: Ciência e Prática. Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil 2004.
10. Cardoso, I.A.P.; Desenvolvimento de método para seleção de políticas de manutenção baseado em análise de risco. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em engenharia. Brasil 2004.
11. Carter, A. D. S.; Mechanical reliability. 2nd ed., Ed. Macmillan, London, 1986.
12. Checket-hanks, B.; Determining the cause of death. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2003.
13. Freitas, M.A., Colossimo E.A.; Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Ed. Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, 1997.
14. Copeland. Emerson Climate Technologies. Manual de compressores Copeland. {http://www.copeland-corp.com/americas/po_tips.htm#Identificação de Falhas Mecânicas em Compressores}. Acesso em 14 outubro de 2004.
15. Cornet, B.J.J.; Análise crítica da aplicação da manutenção centrada em confiabilidade e em risco. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em engenharia. Brasil 2004.
16. Corrêa, H. L. e Corrêa, C. A.; Administração de produção e operações manufatura e serviços; uma abordagem estratégica. Ed. Atlas, São Paulo, 2004.
17. Embraco; Revista Bola Preta nº83. Brasil, 2005
18. Evans, J. R.; Production/operations management quality, performance, and value. 5th ed.; Ed. West Pub. Co., Minneapolis/St. Paul, 1997.
19. Garcia, P. A. A.; Schirru, R.; Frutuoso e Melo, P. F.; A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA. Source: Progress in Nuclear Energy, v 46, n 3-4, Computational Intelligence in Nuclear Applications: Lessons Learned and Recent Developments, 2005.
20. Gauge, S.; The compressor mysteries. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2003.
21. GTZ – Agencia de cooperação técnica Alemã; Proklima: Boas praticas de refrigeração. Montreal protocol unit, Brasil, 2005.
22. Halm-Owoo, A.K.; Suen, K.O. Applications of Fault detection and diagnostic techniques for refrigeration and air conditioning: a review of basic principles. Department of Mechanical Engineering, University College London, UK, 2002.
23. Helman, H; Andery, P.R.P. Análise de falhas (Aplicação dos métodos de FMEA – FTA), Ed. Fundação Cristiano Ottoni, 1985.

24. House, J. M.; Lee, K. D.; Norford, L. K.; Controls and diagnostics for air distribution systems. Source: Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, v 125, Emerging Trends in building Design, Diagnostics, and Operations. 2003.
25. Jourdan, G.; troubleshooting the compressor and diagnosing mechanical problems. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2003.
26. Leitch, R. D.; Reliability analysis for engineers: an introduction. Ed. Oxford University Press, New York, 1995.
27. Lewis, E.E.; Introduction to reliability engineering. 2nd ed., Ed. J. Wiley, New York, 1996.
28. Marais, K e Saleh, J. H.; Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering. Source: Reliability Engineering and System Safety, v 91, n 2, February, 2006.
29. Mirshawka, V.; Manutenção preditiva: caminho para zero defeitos. Ed. Makron Books, São Paulo, 1991.
30. Modarres, M.; What every engineer should know about reliability and risk analysis. Ed. M. Dekker, New York, 1993.
31. Myrefelt, S.; The reliability and availability of heating ventilation and air conditioning systems. Fonte: Energy and Buildings 36.Stockholm, Sweden, 2004.
32. Nelson, Wayne – Accelerated testing: Statistical models, test plans and data analysis. Ed. Wiley, New York 1990.
33. Nepomuceno, L. X. Manutenção preditiva em instalações industriais, v.1, Ed. Edgard Blucher, 1985.
34. Nepomuceno, L. X. Técnicas de manutenção preditiva, v.1, Ed. Edgard Blucher, 1989.
35. Nohle, M.; Handling hermetic compressor burnouts. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 1999.
36. Nutter, D. W.; Cassady, C. R.; Taylor, G. D.; Wong, C. T.; Maintenance-cost modeling for a refrigerated-trailer fleet. Source: Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Seattle, WA, 2002.
37. O'Connor, P.D.; Practical reliability engineering. 4 ed., Ed. Willey, England, 2002.
38. Palady, P.; FMEA: análise dos modos de falha e efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. Ed. IMAM, São Paulo, 2004.
39. Pinto, A. K. e Xavier, J. N.; Manutenção: Função estratégica. 2 ed., Ed. Qualitymark, Brasil, 2005.
40. Prasad, B. G. S.; Effect of liquid on a reciprocating compressor. Fonte: Journal of energy Resources technology, ASME 2002.
41. Schaub, J.; Oil's singular purpose in refrigerant systems. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2001.
42. Silva, A.; Manual: Analise de irregularidades nos compressores alternativos. Bitzer Internacional, 2004.
43. Sporlan: Boletim técnico 40-10. Bulletin 40-10 Catch-All Filter-Driers — Selection. Disponível no site: <http://www.sporlan.com/40-10.htm> no dia 17 de fevereiro de 2006.
44. Stoecker, W.F. e Jones, J.W.; Refrigeração e ar condicionado. Ed. McGraw Hill, pg 1 a 3, 1985.
45. Stoecker, W. F. Refrigeração Industrial, Ed. Edgard Blucher, 1994.
46. Stoecker, W. F.; Jabardo, J. M. S.; Refrigeração industrial, Ed. Edgard Blucher, ed. 2, 2002
47. Tassou, S. A. e Grace, I. N.; Fault diagnosis and refrigerant leak detection in vapour compression refrigerant systems. International journal of refrigeration, 2004.
48. Tomezyk, J. (2003A); Your's compressor worst nightmare. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2003.
49. Tomezyk, J. (2003B); Defrost circuit problems. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2003.
50. Vania, A.; Pennacchi, P. Experimental and theoretical application of fault identification measures of accuracy in rotating machine diagnostics. Dipartimento Di Meccanica, Politécnico di Milano, Campos Bovisa, Via la Massa34, Milano I-20158, Italy 19 January 2003.
51. Venturini, O. J. e Pirani, M. J.; Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial. Trabalho elaborado no âmbito do contrato realizado entre a Eletrobrás/Procel e o consorcio Efficientia/FUPAI, Eletrobrás, Rio de Janeiro 2005.
52. Xu, K; Tang, L. C.; Xie, M.; Ho, S. L.; Zhu, M. L.; Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. Source: Reliability Engineering and System Safety, v 75, n 1, January, 2002.