

IZEDS FELIPE FACCHINI BASSETTO

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

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia.

SÃO PAULO

2007

IZEDS FELIPE FACCHINI BASSETTO

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

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

Co-orientador:

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha
de Souza

SÃO PAULO

2007

Dedicatória

Aos meus pais, Izedo e Ana Maria, à minha irmã Ana Francisca, sempre presentes e incentivadores dos meus estudos.

Agradecimentos

Nos últimos três anos, conheci muitas pessoas incríveis, que se tornaram meus amigos e que juntos com os de mais longa data me ajudaram, nos mais diversos momentos.

Faço especiais agradecimentos ao meu orientador professor Alberto Hernandez Neto.

Meu sincero obrigado ao Professor Gilberto Francisco Martha de Souza.

Obrigado ao amigo de sempre Douglas Lauria.

Agradeço por fim, aos tantos outros que me apoiaram, cujos nomes não citarei para não ser injusto.

RESUMO

Sistemas de refrigeração são sistemas reparáveis. Isto significa que os componentes destes sistemas podem sofrer manutenção várias vezes durante a vida útil do sistema como um todo. Em sistemas de refrigeração o mais conhecido é o que opera com ciclo por 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 como desgaste e falta de lubrificantes, ele está sujeito a sofrer danos decorrentes do funcionamento incorreto ou falho de todos os outros componentes. Dentro dos compressores existentes, o compressor alternativo pode ser comercialmente considerado o cavalo de batalha da refrigeração industrial, dominando a faixa de capacidades inferiores a 300 kW (85 TRs). O compressor alternativo também pode ser utilizado, com vantagens, quando o controle de capacidade se faz necessário, através do procedimento de desativação dos cilindros. Este compressor possui a possibilidade de manutenção no campo de, praticamente, qualquer item construtivo. O termo confiabilidade vem do inglês “reliability” 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, através de estimativa, com base em estudos 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. Uma das ferramentas para permitir avaliar ações que aumentem a confiabilidade é a Análise de Modos e Efeitos de Falha ou FMEA (“Failure Mode and Effect Analysis”). Basicamente, esta ferramenta parte da definição das funções dos sistemas e subsistemas analisados, verificando em seguida as falhas que afetam cada função e todos os modos de falha que levam a cada falha. Para cada modo de falha, analisam-se os efeitos e define-se a necessidade de ações para reduzir a possibilidade de ocorrência deste evento, eliminá-lo ou, simplesmente controlar os efeitos indesejáveis. O objetivo deste trabalho é o estudo das principais falhas, modos de falha de compressores semi-herméticos alternativos de sistemas de refrigeração, suas ocorrências e o comportamento destes equipamentos no seu período de garantia, sob a ótica da confiabilidade.

ABSTRACT

Refrigeration systems are reparable systems. This means that one can perform maintenance actions on them several times during the system life cycle. The most common 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 because, beside problems like wear and lubricant lack, the compressor can also suffer damages caused by the incorrect work or fault from the others system components. Among the compressor types, the reciprocating compressor can be considered as the most used in the industrial refrigeration, from lower capacities to up to 300 kW. Also the reciprocating compressor has some advantages, where its cylinders can be disabled for capacity control purposes. One can perform field maintenance of almost every part for this compressor. The word reliability means the probability of some equipment can not perform its requested function for an established time period, under defined operation conditions.. One of the tools to allow actions to improve the reliability is the failure mode and effect analysis (FMEA). This tool is based on the analyzed function and sub function systems definitions seeking faults that affect each function and all fault modes that lead to every fault. For each fault mode, the effects are analyzed and the need of actions to decrease the occurrence of this event is defined, excluding or control this undesirable events. This work objective is to study the most important faults, fault modes of reciprocating semi-hermetic compressors, its occurrences and its behavior during the guarantee period under reliability point of view.

Sumário

<i>Lista de figuras.....</i>	<i>XI</i>
<i>Lista de tabelas.....</i>	<i>XV</i>
<i>Lista de símbolos.....</i>	<i>XV</i>
<i>Caracteres Gregos.....</i>	<i>XVII</i>
 <i>1. – INTRODUÇÃO.....</i>	 <i>1</i>
<i>1.1 – Contexto.....</i>	<i>1</i>
<i>1.1.1 – Condicionamento de ar.....</i>	<i>2</i>
<i>1.1.2 – Refrigeração industrial.....</i>	<i>3</i>
<i>1.1.3 – Compressores de fluido refrigerante.....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.4 – Manutenção.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.4.1 – Tipos de manutenção.....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.5 – Confiabilidade.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.5.1 – Ensaios Censurados.....</i>	<i>11</i>
<i>1.1.5.2 – Disponibilidade e FMEA.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2 – Motivação.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3 – Objetivo.....</i>	<i>15</i>
<i>1.4 – Metodologia.....</i>	<i>16</i>
 <i>2. Revisão bibliográfica.....</i>	 <i>17</i>

<i>2.1 – Confiabilidade de compressores de sistemas de</i>	
<i>Refrigeração.....</i>	<i>17</i>
<i>2.2 – Ocorrência de falhas de compressores alternativos de sistemas de</i>	
<i>refrigeração.....</i>	<i>21</i>
<i>2.2.1 – Definição de falha.....</i>	<i>21</i>
<i>2.3 – Observações.....</i>	<i>28</i>
3. - CONCEITOS BÁSICOS DE CONFIABILIDADE	30
<i>3.1 – Histórico.....</i>	<i>31</i>
<i>3.2 - Funções de confiabilidade e taxa de falha.....</i>	<i>33</i>
<i>3.2.1 - Curva da Banheira.....</i>	<i>35</i>
<i>3.2.2 - Distribuições de probabilidade.....</i>	<i>36</i>
<i>3.2.2.1 - Distribuição Normal.....</i>	<i>38</i>
<i>3.2.2.2 - Distribuição exponencial.....</i>	<i>40</i>
<i>3.2.2.3 - Distribuição Lognormal.....</i>	<i>43</i>
<i>3.2.2.4 - Distribuição de Weibull.....</i>	<i>44</i>
<i>3.2.2.5 - Teste de adequação.....</i>	<i>47</i>
<i>3.3 - Testes de confiabilidade.....</i>	<i>50</i>
<i>3.3.1 - Métodos para estimativa de parâmetros de distribuições</i>	
<i>probabilísticas.....</i>	<i>52</i>
<i>3.3.2 - Ensaio censurados.....</i>	<i>53</i>
<i>3.4 - Análise de confiabilidade de sistemas.....</i>	<i>55</i>
<i>3.4.1 - Análise de modos e efeitos de falha (FMEA).....</i>	<i>58</i>
<i>3.4.2 – Diagrama de Pareto.....</i>	<i>63</i>

4. – ESTUDO DE CASO.....	65
<i>4.1 – Modos de falha de compressores alternativos considerados neste trabalho.....</i>	<i>65</i>
<i>4.2 - Ocorrência dos modos de falha.....</i>	<i>78</i>
<i>4.3 - Aplicação do FMEA para compressores alternativos.....</i>	<i>84</i>
<i>4.4 - Estimativa de confiabilidade de compressores semi-herméticos alternativos de sistemas de refrigeração.....</i>	<i>87</i>
<i>4.4.1 - Considerações iniciais.....</i>	<i>90</i>
<i>4.4.2 – Avaliação inicial das falhas.....</i>	<i>92</i>
<i>4.4.2.1 - Problemas encontrados.....</i>	<i>99</i>
<i>4.4.3 – Reavaliação dos modos de falha.....</i>	<i>101</i>
<i>4.4.3.1 - Modelo A.....</i>	<i>109</i>
<i>4.4.3.2 - Modelo B.....</i>	<i>110</i>
<i>4.4.3.3 - Modelo C.....</i>	<i>112</i>
<i>4.4.3.4 - Modelo D.....</i>	<i>113</i>
<i>4.4.3.5 - Modelo E.....</i>	<i>114</i>
<i>4.4.3.6 - Modelo F.....</i>	<i>115</i>
<i>4.4.3.7 - Modelo G.....</i>	<i>116</i>
<i>4.4.4 - Curvas selecionadas.....</i>	<i>117</i>
<i>4.4.5 - Considerações finais.....</i>	<i>120</i>
5. – CONCLUSÕES.....	121
<i>5.1 – Considerações sobre o trabalho.....</i>	<i>121</i>
<i>5.2 – Conclusão: Resumo dos resultados.....</i>	<i>123</i>

<i>5.3 - Sugestão para trabalhos futuros.....</i>	<i>124</i>
<i>6. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>126</i>
<i>7. – Anexo 1. FMEA de compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração.....</i>	<i>132</i>
<i>8. – Apêndice 1. Critérios para elaboração do FMEA.....</i>	<i>138</i>
<i>9. – Apêndice 2. Extrapolação do FMEA.....</i>	<i>140</i>
<i>10. – Apêndice 3. Ocorrência individual dos modos de falha dos compressores em estudo.....</i>	<i>141</i>

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema dos componentes principais e sua disposição em um sistema de compressão de vapor simplificado.....	2
Figura 2 – Curva da banheira.....	35
Figura 3 – Função densidade de probabilidade da distribuição normal.....	39
Figura 4 – Função Confiabilidade da distribuição normal.....	40
Figura 5 – Função Taxa de Falha da distribuição normal.....	40
Figura 6 – Função densidade de probabilidade da distribuição exponencial.....	41
Figura 7 – Função Confiabilidade da distribuição exponencial.....	42
Figura 8 – Função Taxa de Falha da distribuição exponencial.....	42
Figura 9 – Função densidade de probabilidade da distribuição Lognormal.....	43
Figura 10 – Função Confiabilidade da distribuição Lognormal.....	44
Figura 11 – Função Taxa de Falha da distribuição Lognormal.....	44
Figura 12 – Função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.....	46
Figura 13 – Função confiabilidade da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.....	47
Figura 14 – Taxa de falha da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.....	47
Figura 15 – Tipos de dados de confiabilidade.....	56
Figura 16 – Histórico de um sistema reparável.....	65
Figura 17 - Pistões desgastados por Retorno de fluido refrigerante no estado líquido.....	66
Figura 18 - Compressor com carter congelado.....	67
Figura 19 - Virabrequim com sinais de desgaste por problemas de	

lubrificação.....	68
Figura 20 - Válvulas danificadas por golpe de líquido.....	70
Figura 21 - Danos resultantes de um golpe de líquido.....	70
Figura 22 - Válvulas carbonizadas.....	71
Figura 23 - Pistão com óleo carbonizado.....	72
Figura 24 - Umidade presente no bloco do compressor.....	73
Figura 25 - Filtros de sucção entupidos.....	74
Figura 26 - Filtro de óleo entupido por óxidos.....	75
Figura 27 - Bomba de óleo “cobreada”.....	76
Figura 28 - Motor queimado.....	77
Figura 29 - Queima de um único ponto do enrolamento do motor.....	78
Figura 30 – Diagrama de Pareto para os modos de falha do compressor alternativo.....	83
Figura 31 – Esquema da distribuição dos componentes de uma câmara frigorífica real.....	86
Figura 32 – Curvas de confiabilidade encontradas para as distribuições Lognormal e de Weibull.....	95
Figura 33 – Curvas da taxa de falha encontradas para as distribuições Lognormal e de Weibull.....	95
Figura 34 – Vidas estimadas dos compressores estudados.....	99
Figura 35 – Vidas médias estimadas dos compressores estudados.....	100
Figura 36 – Características construtivas/ tipos de blocos dos compressores.....	103
Figura 37 – Características construtivas/ potência e numero de cilindros dos compressores.....	104

Figura 38 – Características construtivas/ potência e numero de cilindros dos compressores.....	105
Figura 39 – Ocorrência de falhas ao longo da vida em garantia de cada modelo de compressor.....	106
Figura 40 – Ocorrência dos modos de falha dos compressores.....	107
Figura 41 – Ocorrência dos efeitos de falha dos compressores.....	108
Figura 42 – Curvas de confiabilidade do compressor A.....	109
Figura 43 – Curvas de taxa de falha do compressor A.....	110
Figura 44 – Curvas de confiabilidade do compressor B.....	111
Figura 45 – Curvas de taxa de falha do compressor B.....	111
Figura 46 – Curvas de confiabilidade do compressor C.....	112
Figura 47 – Curvas de taxa de falha do compressor C.....	112
Figura 48 – Curvas de confiabilidade do compressor D.....	113
Figura 49 – Curvas de taxa de falha do compressor D.....	113
Figura 50 – Curvas de confiabilidade do compressor E.....	114
Figura 51 – Curvas de taxa de falha do compressor E.....	114
Figura 52 – Curvas de confiabilidade do compressor F.....	115
Figura 53 – Curvas de taxa de falha do compressor F.....	115
Figura 54 – Curvas de confiabilidade do compressor G.....	116
Figura 55 – Curvas de taxa de falha do compressor G.....	116
Figura 56 – Curvas de confiabilidade selecionadas dos compressores.....	118
Figura 57 – Curvas de taxa de falha selecionadas dos compressores.....	119
Figura 58 – FMEA Retorno de fluido refrigerante no estado líquido.....	132
Figura 59 – FMEA Partida Inundada.....	133
Figura 60 – FMEA Problemas de lubrificação.....	133

Figura 61 – FMEA Golpe de líquido.....	134
Figura 62 – FMEA Superaquecimento excessivo.....	134
Figura 63 – FMEA Contaminação por umidade.....	135
Figura 64 – FMEA Contaminação por impurezas do ar.....	135
Figura 65 – FMEA Contaminação por óxidos.....	136
Figura 66 – FMEA Cooper plating.....	136
Figura 67 – FMEA Sobrecarga do motor elétrico.....	137
Figura 68 – FMEA Rompimento do enrolamento do motor elétrico.....	137

Lista de tabelas

Tabela 1 - Exemplo de tabela de FMEA.....	63
Tabela 2 – Diagrama de Pareto para os modos de falha do compressor alternativo.....	81
Tabela 3 - Índices de severidade de modo de falha.....	85
Tabela 4 – Dados de entrada do programa de confiabilidade.....	89
Tabela 5 – Compressores alternativos selecionados para o teste de confiabilidade.....	91
Tabela 6 – Coeficientes de correlação.....	93
Tabela 7 – Valores dos parâmetros encontrados para as distribuições Lognormal e de Weibull.....	94
Tabela 8 – Ocorrência dos modos de falha considerados para um funcionamento de 20 horas e 20 dias por mês.....	96
Tabela 9 – Vidas estimadas dos compressores estudados.....	99
Tabela 10 – Características físicas e de aplicação dos compressores.....	102
Tabela 11 – Vida estimada do compressor com uma confiabilidade de 0,90.....	120
Tabela 12 – Ocorrência dos modos de falha dos compressores estudos.....	141

Lista de Símbolos

E_i - Classificação do valor estimado acumulado para a distribuição assumida;

$\hat{F}(t_i)$ - Estimativa da função distribuição acumulada, no intervalo de tempo t_i ;

$f(t)$ - Função densidade de probabilidade, no intervalo de tempo t ;

$F(t)$ - Função distribuição acumulada, no intervalo de tempo t ;

$f(x)$ - Função densidade de probabilidade de x ;

$F(x)$ - Função distribuição acumulada de x ;

$\hat{f}_i$ - Função densidade de probabilidade ajustada, definida em um intervalo de tempo;

ku - Coeficiente de Kurtosis;

$L(\theta ; t_1, t_2, \dots, t_n)$ - Função verossimilhança para uma amostra aleatória;

M - Intervalo de tempo;

$\hat{\mu}$ - Média estimada;

N - Número de itens em teste;

$n_1, n_2, \dots, n_i$ - Numero de itens sobreviventes;

r - Coeficiente de correlação da definição;

$R(t)$ - Função probabilidade acumulada da ocorrência de sobreviventes, probabilidade de sucesso ou confiabilidade, no intervalo de tempo t ;

$\hat{R}(t_i)$ - Função confiabilidade estimada, no intervalo de tempo t_i ;

$R^2 (r^2)$ - Coeficiente de correlação;

sk - Coeficiente de assimetria;

S_x^2 e S_y^2 - Variâncias da amostra em estudo;

S_{xy} - Covariância;

t - Tempo;

T_1 e T_2 - Intervalo de tempo;

$t_1, t_2, \dots, t_n$ - Serie de tempos de falha para N unidades em teste;

t_i - Nomenclatura estatística do teste;

t_0 - Constante de localização que define a origem da distribuição de Weibull;

t_0 - Mediana de t na distribuição lognormal;

x - Variável aleatória;

$\bar{x}$ - Média da variável x ;

x_i - Classificação do valor acumulado da distribuição X^2 ;

y - função de x .

y_i - Coordenada da curva e a curva de regressão;

Caracteres gregos

α - Desvio padrão da distribuição lognormal;

β - Constante de forma, que primariamente controla a forma da curva da distribuição de Weibull;

Δx - Intervalo de x ;

Δi - Intervalo de tempo discreto;

δt - Intervalo de tempo contínuo;

$\lambda(t)$ - Taxa de falha;

θ - Parâmetro da distribuição;

$\hat{\theta}$ - Estimador máximo da verossimilhança de θ ;

η - constante de escala, que estima a distribuição de Weibull ao longo do tempo;

σ - desvio padrão;

σ^2 - variância de x ;

$\hat{\sigma}^2$ - variância estimada;

μ - média de x ;

1. – INTRODUÇÃO

1.1– Contexto

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.

O objetivo principal do ciclo de refrigeração ou frigorífico é transferir a energia produzida em uma região em que se deseje manter a temperatura controlada para uma outra região de alta temperatura.

Dentro dos ciclos de refrigeração, podemos citar os ciclos por compressão de vapor, ciclos por absorção e outros de fins mais específicos utilizados pela indústria.

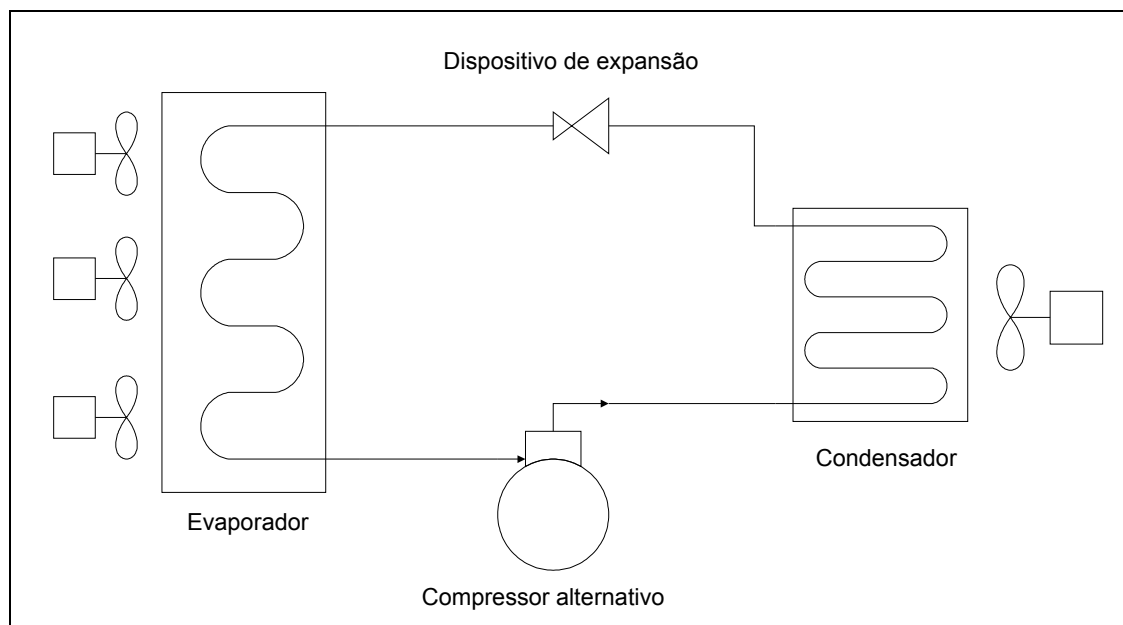


Figura 1 – Esquema dos componentes principais e sua disposição em um sistema de compressão de vapor simplificado.

Na Fig. 1 podemos visualizar um esquema simplificado de um sistema por compressão de vapor e seus componentes principais. Para um sistema completo deveriam ser incluídos os filtros, reservatórios, válvulas e equipamentos de controle.

Stoecker (1985) divide a refrigeração em dois ramos: condicionamento de ar e refrigeração industrial. Os componentes básicos dos dois ramos não diferem e são: trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubos, dutos e controles, sendo que estes sistemas consistem num ciclo frigorífico.

1.1.1 – Condicionamento de ar

Um dos principais objetivos do condicionamento de ar é gerar condições para o conforto térmico humano, sendo que este é definido pela ASHRAE (2001) como “Conforto térmico é a condição que a mente expressa satisfação com o meio ambiente”.

Esta definição deixa em aberto o que significa: mente ou satisfação, mas indica que o julgamento da sensação térmica não só é definido por condições físicas como também por condições psicológicas. As atividades do metabolismo do corpo humano resultam quase que em sua totalidade em calor, que deve ser continuamente dissipado e regulado para manter a temperatura normal do corpo.

A troca de calor insuficiente superaquece o corpo gerando uma condição de hipertermia enquanto um excesso de troca de calor promove uma condição de hipotermia, ambas maléficas ao corpo humano. Quando a temperatura da pele atinge temperaturas maiores que 45°C ou menores que 18°C causam dor e elevado desconforto, temperaturas internas do corpo abaixo de 28°C pode causar arritmia e morte enquanto temperaturas maiores que 46°C podem causar danos irreversíveis ao cérebro (ASHRAE, 2001). Portanto, mesmo em regiões onde as temperaturas sejam amenas, os edifícios podem ser refrigerados para compensar a liberação de calor por pessoas, luzes e outros aparelhos elétricos.

Em edifícios comerciais e indústrias, o condicionamento de ar ajuda a aumentar a eficiência dos usuários (funcionários), já em outras instalações como hospitais que exigem condições controladas de temperatura e umidade, o condicionamento de ar se mostra imprescindível para garantir que se evita o processo de contaminação, por exemplo, em salas de cirurgia.

Em outras áreas industriais (laboratórios, imprensa, têxteis, processos de precisão, salas limpas, salas de computador usinas), em que existem funcionários trabalhando em condições insalubres, esta modalidade da refrigeração serve para atenuar problemas e aumentar a sensação de conforto e conservar componentes e equipamentos, que são sensíveis a temperaturas e umidade elevadas.

1.1.2 – Refrigeração industrial

A refrigeração industrial apresenta uma série de similaridades com o condicionamento de ar, mas também se distingue por diversos aspectos como componentes, procedimentos de projeto e mercadológico (Stoecker, Jabardo; 2002).

Ela pode ser caracterizada pela faixa de temperatura de operação. No limite inferior as temperaturas podem atingir valores entre -60°C a -70°C e 15°C no limite superior.

Aplicações em que se verifiquem temperaturas menores que as citadas pertencem ao ramo da criogenia, ao qual se especializa na produção e utilização de gás natural liquefeito, oxigênio e nitrogênio líquidos. Outra forma de se caracterizar a refrigeração industrial seria através das aplicações. Assim a refrigeração industrial poderia ser descrita como sendo o processo utilizado nas indústrias químicas, de alimentos e de processos (envolvendo dois terços das aplicações) e a indústria manufatureira e de laboratórios.

Algumas aplicações de bombas de calor poderiam ser associadas à refrigeração

industrial, onde a rejeição de calor se realiza a temperaturas relativamente elevadas em relação à temperatura ambiente.

A refrigeração industrial abrange vários setores tais como: o de alimentos refrigerados onde a conservação em baixas temperaturas (sem congelamento) aumenta a vida útil dos produtos; de alimentos congelados no qual o processamento de alimentos com o uso do processo de congelamento é utilizado para transformar as características dos alimentos ou controlar a ação de determinados microorganismos.

Pode-se observar o uso da refrigeração em diversos setores como na fabricação de concreto ou na indústria química e de processos onde são utilizados sistemas de refrigeração de grande porte para a separação de componentes de uma mistura por condensação de gases ou por solidificação de uma espécie química, remoção do calor de uma reação química e mesmo a manutenção de uma substância no estado líquido a baixa temperatura para controlar a pressão no interior do vaso de armazenamento.

1.1.3 – Compressores de fluido refrigerante

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).

De acordo com Venturini et al (2005) e baseado nas características do processo de compressão, os compressores utilizados em processos de refrigeração podem ser divididos em: máquinas de deslocamento positivo ou máquinas de fluxo. O compressor de deslocamento positivo aumenta a pressão do fluido refrigerante pela redução do volume interno de uma câmara de compressão por meio de uma força mecânica aplicada. Os compressores alternativos, de palheta, parafusos e caracol são classificados como de deslocamento positivo enquanto os compressores centrífugos são os únicos classificados

como máquinas de fluxo. Para este último tipo de compressor, o aumento de pressão se deve principalmente a conversão de pressão dinâmica em pressão estática.

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 rotativos do tipo parafuso, ou simplesmente 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.

Ele é o único utilizado nas instalações de amônia, podendo também operar com compostos halogenados. 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. Este compressor deve seu nome ao fato de permitir a remoção do cabeçote, tornando-os acessíveis as válvulas e os pistões. 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. Tanto os compressores herméticos quanto os seus similares, os semi-herméticos, eliminam a necessidade de um selo para a vedação do eixo, o que já não ocorre nos compressores abertos. Entretanto, os compressores herméticos e semi-herméticos podem perder um pouco de sua eficiência devido ao aquecimento ocasionado pelo contato do refrigerante com os enrolamentos 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 rotativos 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. O compressor alternativo também pode ser utilizado com vantagem quando o controle de capacidade se faz necessário, através do procedimento de

desativação dos cilindros. Outra vantagem do compressor alternativo, em relação ao de parafuso, é a possibilidade de manutenção no campo de, praticamente, qualquer item construtivo.

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.

1.1.4 – Manutenção

Uma outra preocupação cada vez mais crescente atualmente e que é atingida pela manutenção bem realizada é a eficiência dos sistemas de refrigeração com a redução do consumo de energia. A incorreta operação e as falhas dos equipamentos acarretam grande desperdício de energia (Tassou, Grace; 2004); (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.

Cada vez que um sistema sofre manutenção, a consequência pode ser benéfica ou não no funcionamento do componente (a substituição de um componente danificado por um novo pode ocasionar o sobre-carregamento dos demais componentes mais desgastados), sendo que isto irá ocorrer com quase todos os componentes e subsistemas.

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).

A manutenção deve ser baseada primordialmente num plano bem elaborado, estudado com grande cuidado e objetividade e que leve em consideração todos os elementos da instalação, até os mínimos detalhes da organização e da metodologia que é empregada, visando à obtenção do menor gasto de recursos financeiros e humanos

possível. Para isso é importante não somente reduzir os custos, mas realizar esta redução de maneira eficiente.

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, secções e divisões de toda a fábrica.

Assim Nepomuceno (1985) ressalta que tanto os envolvidos com a chefia dos outros departamentos ou secções devem contribuir e colaborar (inclusive a alta direção) com a política de manutenção, pois a operação é integrada, abrangendo todos os componentes da instalação, devendo ser considerada como uma unidade que funciona harmoniosamente de maneira global. Isto deve ser feito de forma que todos os setores tenham responsabilidade e consciência das rotinas de manutenção da 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 tem 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 concentração de ozônio na estratosfera do planeta é conhecida como camada de ozônio. Esta camada cumpre um papel de grande importância, pois é responsável por filtrar as radiações solares, que com sua maior incidência, podem causar grandes prejuízos à humanidade como câncer, catarata, queda do sistema imunológico. Alguns elementos químicos, como cloro e o bromo, quando dispersos na atmosfera atingem a estratosfera e reagem com o ozônio, que muda de estado. Desta forma, reduzindo a camada de ozônio, estes elementos eram comumente empregados nos fluidos refrigerantes, clorofluorcarbonos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs).

Em 1990, o Brasil firmou o protocolo de Montreal sobre substâncias que destroem a camada de ozônio. Assim o governo brasileiro assumiu o compromisso de eliminar a produção e o consumo de CFCs até o final da década. Estes gases já deixaram de ser fabricados no país e o consumo vem caindo devido a restrições nas cotas de importações, que acarretam numa elevação do valor de venda destes produtos (GTZ, 2005).

O acúmulo de dióxido de carbono e outros gases tóxicos têm sido considerados responsáveis pela elevação da temperatura do planeta nos últimos anos. O acúmulo destas substâncias na atmosfera forma uma camada que impede o calor emitido pelo planeta de se dispersar e desta forma causa grandes mudanças climáticas como aumento dos níveis de chuva, elevação dos níveis dos oceanos entre outros.

No início dos anos 90 foram introduzidos no mercado o hidrofluorcarbonos (HFCs) como substitutos aos CFCs e os HCFCs, pois não agredem a camada de ozônio, mas, no entanto, estes novos fluídos contribuem para o aquecimento global e devem ser reduzidos.

Ao longo da década de 90 foi amplamente discutido este tema e finalmente no ano de 2005, um grande número de países firmou um acordo conhecido como Protocolo de Kyoto onde se busca frear o aquecimento global. Dentre os países ditos do “primeiro mundo” o único a ficar de fora foram os Estados Unidos da América. O protocolo de Kyoto funciona por metas onde os países do grupo 1 (países industrializados) devem reduzir em 5,2% suas emissões de seis gases em relação aos níveis de 1990, enquanto países mais pobres, como os da América Latina, devem tentar reduzir suas emissões, mas sem metas definidas. Sendo os HFCs amplamente utilizados no Brasil e este se enquadrando no segundo grupo do acordo a utilização destes refrigerantes ainda são previstas por muitos anos (Embraco; 2005).

Neste contexto se encaixa outra importância da manutenção, que além de promover a diminuição de custos, aumento da produtividade, ou mesmo segurança imediata dos consumidores e funcionários, deve minimizar ou impedir a perda ou vazamento dos fluidos refrigerantes para se evitar danos ambientais.

1.1.4.1 – Tipos de manutenção

O tipo mais conhecido de manutenção é sem dúvida a manutenção corretiva que é feita após a ocorrência da falha, ou seja, depois da quebra do equipamento. Em geral, ela é executada com a parada total e/ou parcial do equipamento. Historicamente, foi o primeiro tipo de manutenção que se conhece e a única realizada até Segunda Guerra Mundial (Pinto, Xavier; 2005).

Já a manutenção preventiva surgiu a partir da Segunda Guerra Mundial quando as pressões do período da guerra aumentaram a demanda por todo tipo de produtos. Ao mesmo tempo, o contingente de mão de obra industrial diminuiu sensivelmente, como consequência houve um grande aumento da mecanização, bem como da complexidade das instalações industriais (Pinto, Xavier; 2005).

Começa a evidenciar-se a necessidade de maior disponibilidade, bem como maior confiabilidade, na busca por maior produtividade, fazendo com que a indústria dependa cada vez mais do bom funcionamento das máquinas. Isso exige que as falhas dos equipamentos devam ser evitadas, o que resultou no conceito de manutenção preventiva,

caracterizada por intervenções regulares e em períodos fixos, para executar tarefas pré-determinadas. Isto se traduz na necessidade do conhecimento dos modos de falha mais freqüentes, da taxa de falhas e, principalmente, a periodicidade com que as falhas ocorrem.

Porém, este tipo de manutenção baseia-se em análises estatísticas, de elevada incerteza, sendo comum o aparecimento de ruptura prematura no componente substituído (Nepomuceno, 1989).

A partir da década de 70, acelerou-se o processo de mudança na indústria, com a implementação de novas tecnologias, com elevado aumento da capacidade de produção de produtos bem como das linhas de montagem, tornando estas mais complexas e as indústrias mais competitivas. Desta forma a paralisação da produção indicava um aumento maior dos custos e reduzia a qualidade dos produtos. Na manufatura, os efeitos dos períodos de paralisação foram se agravando pela tendência mundial de utilizar sistemas “just in time”. Isto promoveu o surgimento do conceito de estoques reduzidos que exigia a redução de qualquer parada não programada da linha de produção ou da fábrica inteira. O crescimento da produção com automação e mecanização resultou em um aumento no número de falhas e na capacidade de manter “padrões de qualidade” estimados. Isso pode ser aplicado tanto a qualidade de serviços quanto de produtos e, neste ambiente, reforça-se o conceito de manutenção preditiva (Pinto, Xavier; 2005).

A manutenção preditiva de máquinas e equipamentos vem encontrando aceitação crescente na indústria e a economia resultante desta prática se torna tanto mais significativa quanto maior o valor unitário da máquina ou das perdas decorrentes de interrupções de seu funcionamento por defeitos ou reparos (Vânia, Pennacchi; 2003).

Este tipo de manutenção consiste basicamente em monitorar parâmetros que caracterizam a condição de operação correta da máquina, de forma a poder prever a época da provável ocorrência da falha e, se possível, localizar e diagnosticar o tipo de falha para ser feito um planejamento adequado da operação de manutenção da forma mais conveniente. Os parâmetros que melhor caracterizam a condição dessa operação variam de acordo com o equipamento em análise.

1.1.5 - *Confiabilidade*

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.

Já nos anos 60, 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 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, através de estimativa, 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, com a análise dos dados de amostras retiradas da população (família de equipamentos em estudo), para obter-se uma estimativa dos parâmetros significativos desta população analisada.

1.1.5.1 – Ensaios Censurados

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 acontece 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).

1.1.5.2 – Disponibilidade e FMEA

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.

A disponibilidade pode ser definida como sendo um tempo que equipamento, sistema ou instalação está disponível para operar ou em condições de produzir.

Uma das ferramentas para permitir 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, esta ferramenta parte da definição das funções dos sistemas e subsistemas analisados, verificando em seguida as falhas que afetam cada função e todos os modos de falha que levam a cada falha. Para cada modo de falha, analisam-se os

defeitos e define-se a necessidade de ações para reduzir a possibilidade de ocorrência deste evento, eliminá-lo ou, simplesmente controlar os efeitos indesejáveis.

Esta técnica tem a desvantagem de ser uma análise indutiva, exclusivamente qualitativa, e considera os modos de falha independentes (Cornet, 2004).

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.

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)?
- Quais os efeitos destas falhas sobre o sistema?

- 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.

1.2 - Motivação

Ao longo da pesquisa bibliográfica já realizada, foram encontrados poucos trabalhos que avaliam as principais falhas e a confiabilidade dos compressores alternativos de sistemas de refrigeração principalmente referente ao mercado brasileiro. Dos trabalhos até o momento analisados, verificou-se que os manuais dos fabricantes são a maior fonte de informações relacionadas às falhas deste tipo de compressor, que por suas características tem sido considerado ao longo dos anos, “o cavalo de batalha da refrigeração industrial” (Stoecker, Jabardo; 2002).

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 (Stoecker, Jabardo; 2002).

Para termos uma idéia da importância destes equipamentos numa instalação de refrigeração, Breuker e Braun (1998) identificam as falhas mais comuns de sistemas de climatização do tipo “rooftop” (equipamentos que abrangem uma grande gama de

capacidades, sendo encontrados no mercado de 7 a 370 kW). Nesta identificação, os impactos no custo de manutenção do sistema são avaliados bem como as frequências de ocorrência e custos relativos dos serviços executados são estimados pela análise dos relatórios de serviço.

As informações de falhas na pesquisa de Breuker e Braun (1998) foram obtidos em uma base de dados de uma companhia especializada na manutenção dos chamados “roof top” utilizado em lojas. Durante o período de 1989 a 1995, foram estudados, com uso de ferramentas estatísticas, mais de 6000 ocorrências de falhas e sua frequência de ocorrência bem como o custo destas falhas. A informação de frequência de ocorrência permite a avaliar as falhas ou pontos a serem protegidos do equipamento. Observa-se que nem todas estas falhas tem um custo alto para serem reparadas, mas causam grande desconforto e um grande número de visitas do técnico de manutenção. O custo total de reparo aponta as falhas que mais aparecem nos custos das folhas de serviços.

No caso da distribuição de ocorrência das falhas, foi verificado que os compressores representam apenas 5% das ocorrências das falhas. A maior parte das ocorrências é devida às falhas elétricas e de controle que representam 41% das ocorrências e problemas por falta de fluido refrigerante que ocasionam 12% das ocorrências.

Entretanto, o estudo da distribuição do custo de reparo de cada equipamento revelou que, apesar de representar apenas 5% das ocorrências, o compressor representa 24% do custo de reparo do sistema, enquanto as falhas elétricas e de controle representam 17% e perda de fluido refrigerante 5% do custo de reparo. Dessa forma, apesar da baixa incidência de falhas no compressor, o seu impacto do ponto de vista de custos de manutenção é bastante significativo.

Para que se possa verificar quais os principais modos de falha destas máquinas e suas características, é necessário um levantamento de um histórico, pois é um equipamento amplamente utilizado e conhecido pela indústria. Com esta informação, pode-se verificar a ocorrência destas falhas e sua confiabilidade.

Sendo assim, é possível verificar quais os pontos mais sensíveis de uma instalação de refrigeração e dos seus componentes e em particular do compressor. Este último, por ser um equipamento complexo ligado diretamente à linha de refrigerante, sofre as consequências das falhas dos outros componentes. Sendo assim, sua análise permite ter-se uma idéia da “saúde” do sistema. Com análise da propagação e origem dos modos de falha, é possível verificar onde atuar e quais as consequências de não corrigir os problemas detectados.

1.3 - Objetivo

O objetivo deste trabalho é o estudo das principais falhas, modos de falha de compressores semi-herméticos alternativos de sistemas de refrigeração, suas ocorrências e o comportamento destes equipamentos no seu período de garantia sob a ótica da confiabilidade.

Para isso foi realizado primeiro um levantamento das principais falhas e modos de falha de compressores alternativos semi-herméticos na literatura disponível.

Com este dados, foi realizado um levantamento em campo da ocorrência destes modos de falha das principais falhas e modos de falha aos quais estes equipamentos estão sujeitos.

Este levantamento foi realizado com base em dados disponibilizados por um grande fabricante destes equipamentos.

Na sequência foi realizado um estudo destes modos de falha com o uso da ferramenta Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA), onde se verificou a causa destes modos de falha e seus efeitos bem como as ações a serem tomadas para se evitar ou minimizar seus efeitos e ocorrência.

Foi realizado o estudo da confiabilidade deste tipo de compressor no seu período de garantia não só se vinculando as falhas do compressor, mas também as do sistema de compressão de vapor que o afetam.

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

1.4 - Metodologia

Este trabalho será dividido em três partes: a primeira é um estudo das principais falhas e modos de falhas de compressores alternativos semi-heméticos de sistemas de refrigeração. Além disso, será feito um estudo da ocorrência de falhas em compressores alternativos deste sistema, utilizando-se dados coletados no setor de manutenção de uma empresa do setor de refrigeração comercial referente a um período de dois anos de ocorrências registradas.

A segunda parte focará o uso do FMEA como ferramenta de gestão de manutenção, pois o FMEA é normalmente considerado uma ferramenta da confiabilidade, por atuar diretamente na disponibilidade do equipamento sendo assim utilizado como ferramenta pela manutenção. Para a criação do FMEA, é necessária a reunião de uma equipe para estudar como determinado componente pode falhar. No entanto, uma forma de se evitar este gasto ou mesmo ganhar tempo é o uso do histórico do equipamento e com isso já se ter um ponto de partida para o estudo. Para um equipamento novo que não possui um histórico pode-se recorrer ao fabricante ou a um banco de dados, ou neste trabalho o banco de dados criado no estudo já realizado.

A última parte deste trabalho será um estudo de confiabilidade de compressores alternativos, que será realizado durante o período de garantia, com os dados coletados junto a um grande fabricante do setor. Com este estudo será possível quantificar a capacidade deste tipo de equipamento operar corretamente durante este período.

Cada parte deste trabalho está ligada diretamente à outra, pois o estudo de falhas e modos de falhas forneceram informações para a construção do FMEA, que por sua vez fornecerá dados e conhecimento, junto com a análise de ocorrência, para o estudo de confiabilidade.

2. Revisão bibliográfica

2.1 – Confiabilidade de compressores de sistemas de refrigeração

Existem diversos trabalhos envolvendo a confiabilidade para equipamentos eletro-eletrônicos segundo Nelson et al (1989), no entanto equipamentos mecânicos no geral são “extremamente complicados e difíceis de serem modelados segundo este conceito, por isso possui-se pouca informação disponível e organizada para uma metodologia de análise”.

O uso das ferramentas da confiabilidade para sistemas de refrigeração é ainda mais raro, todavia foram encontrados alguns trabalhos que abrangem este tema.

A análise da forma como proposta para a pesquisa aqui desenvolvida onde se avalia as principais ocorrências de falhas em equipamentos de refrigeração, principalmente compressores, só foi encontrada no trabalho de Nelson et al (1989), onde é apresentada uma metodologia para auxiliar os projetistas destes componentes com o uso de ferramentas da confiabilidade.

Na metodologia desenvolvida por Nelson, inicialmente, define-se o equipamento a ser estudado. O sistema que contém este equipamento deve ser dividido em classes funcionais, e estes componentes em partes menores até o ponto onde se deseja aprofundar o estudo.

O próximo passo é a elaboração de um FMEA (simplificado abordando apenas causa e efeito) para facilitar a definição dos mecanismos primários e secundários de falha.

Em seguida, realiza-se uma busca na literatura disponível dos dados relativos às falhas e após esta busca, deve-se acessar uma fonte de dados para aplicar a análise desta fonte. Sugere-se que o banco de dados de uma empresa do setor com os dados de garantia do equipamento, para uma maior qualidade de informação. Deve-se levar em consideração a dificuldade de se definir as falhas, pois as mesmas podem ocorrer de forma similar ou ao mesmo tempo.

O passo seguinte é a aplicação destes dados em uma expressão desenvolvida para este fim (apresentada em Nelson et al (1988) para equipamentos mecânicos é equacionada a partir de um banco de dados através do método da regressão linear), para se conseguir um valor quantitativo da confiabilidade.

O trabalho de Nelson é realizado a título de demonstração da ferramenta de FMEA, não sendo executados todos os passos propostos e abordando-se poucos problemas para

simplificar o estudo, sendo considerados como sistema diversos tipos de compressores, entre eles, o alternativo.

Aplicações da confiabilidade na refrigeração podem ser encontradas de forma mais detalhada em outros trabalhos que abrangem diferentes equipamentos de refrigeração.

O trabalho de Yan-Qiao et al (1996) para containeres frigoríficos e de Nutter et al (2002) para carretas frigoríficas são mais completos e detalhados. Ambos partiram do banco de dados de empresas de manutenção dos respectivos equipamentos, bem como optaram por testes conhecidos como censurados (onde os equipamentos estudados não necessitam todos terem falhado), que permite a inclusão de um maior número de itens ao escopo da análise, no entanto apresentam objetivos diferentes.

O trabalho de Yan-Qiao et al (1996) visa o estudo da confiabilidade de containeres frigoríficos no geral extrapolando os dados observados ao longo de quatro anos de relatórios. Para isso, foram assumidos os problemas descritos nos relatórios e a informação foi padronizada e organizada, para após isso ser aplicado o método de estimação de parâmetros estatísticos da máxima verossimilhança (que foi considerada a mais adequada dadas as características dos dados) com a distribuição de Weibull (que abrange um grande número de comportamentos). Vale ressaltar neste trabalho que os fabricantes dos equipamentos foram chamados de A, B, C e D para se evitar a identificação dos mesmos.

Isto também foi feito, devido à dificuldade de se identificar o problema do equipamento quando mais de um modo de falha foi identificado.

O trabalho de Nutter et al (2002) parte para uma abordagem mais voltada para a manutenção visando fornecer uma ferramenta para sua otimização e levantamento do custo de operação de carretas frigoríficas. Partindo do levantamento do banco de dados é realizado um FMEA para padronização e um melhor entendimento das falhas. Em seguida, é elaborada uma árvore de análise de falhas (FTA) que permite o entendimento da propagação das falhas ao longo do sistema bem como a visualização da ocorrência de mais de uma falha ao mesmo tempo. Em seguida, o autor utiliza o diagrama de Pareto visando a sua hierarquização em função das ocorrências das falhas e do seu custo. A confiabilidade é levantada pelo método da regressão linear onde se verificam os valores como: tempo médio até a falha e intervalo entre falhas, para desta forma se estimar o custo de operação e os pontos a serem atacados.

Nota-se, pelos trabalhos pesquisados aqui, que a maioria não aborda especificadamente o componente aqui focado, ou seja, o compressor. Desta forma, a pesquisa bibliográfica teve que ser expandida e contemplou outros equipamentos e

componentes relacionados à refrigeração, porém buscou trabalhos que utilizassem a metodologia de confiabilidade e análise de falhas. Dentre os trabalhos encontrados, pode-se afirmar que Nelson et al (1989) foi o que mais se aproximou em termos do equipamento analisado, porém a sua análise foi bastante simplificada. Já os trabalhos de Yan-Qiao et al (1996) e Nutter et al (2002) apresentam um detalhamento maior no que diz respeito à metodologia de confiabilidade e resultados.

O trabalho de Dhillon (1995) apresenta uma abordagem que visa auxiliar a gestão da manutenção, pois realiza um estudo de otimização dos custos de manutenção usando ferramentas da confiabilidade, onde o autor afirma: “Custo de operação de um equipamento pode ser muito significativo e ultrapassa o custo de aquisição do mesmo, por exemplo, um estudo realizado pelo ministério da defesa dos Estados Unidos, que o custo de manutenção de um equipamento ultrapassa por diversas vezes o custo de aquisição do mesmo ao longo de sua vida útil”. A distribuição estatística utilizada para modelar o comportamento dos equipamentos é a exponencial, pois é a que permite a melhor análise de eventos aleatórios. Inicialmente, o trabalho aborda as principais falhas e problemas encontrados na literatura disponível, como forma de se conhecer estes itens e criar uma padronização de linguagem. Este foi o único trabalho encontrado que ressalta a importância da manutenção de maneira significativa bem como faz uso de ferramentas estatísticas como ferramenta para a gestão de manutenção.

Em seguida serão abordados trabalhos relativos à ocorrência de falha, cuja importância já foi ressaltada anteriormente.

O primeiro trabalho a ser analisado é o de Clarotti et al (2004) que apresenta um método para análise de falha em equipamentos mecânicos de uma forma geral. Para isso ele propõe um FMECA aplicado a estes equipamentos. O autor verifica a dificuldade de se separar as diferentes falhas encontradas devido ao fato destas falhas ocorrerem de forma simultânea em um mesmo equipamento. Em virtude disto, o método se apresenta muito subjetivo e, conseqüentemente, muito dependente do profissional que o realiza.

Dentre as ferramentas para a análise de ocorrência de falha, Nutter (Nutter et al, 2002) enfatiza o uso do diagrama de Pareto, pois esta permite uma hierarquização das falhas de forma quantitativa.

O uso do FMEA é particularmente amplo, sendo utilizado no projeto e fabricação de produtos. Em manutenção, o FMEA é empregado como forma de otimização do tempo, hierarquização de falhas (componentes) e como forma de padronização de conhecimento sobre o equipamento e medidas necessárias para projeto, produção e gestão da manutenção

(Nelson et al, 1988) (Nelson et al, 1989) (Nutter et al, 2002) (Clarotti et al 2004) (Garcia et al, 2005).

O estudo da confiabilidade de equipamentos mecânicos é amplo e complexo, dada à variedade de forma que as falhas podem ocorrer. A forma tradicional destes estudos é efetuada com o auxílio do banco de dados de empresas fornecedoras dos equipamentos e/ou de sua manutenção, usualmente utilizando a análise com dados censurados (limitados no tempo que este banco de dados fornece) como apresentados nos trabalhos de Nelson (Nelson et al, 1988; Nelson et al, 1989), Nutter (Nutter et al, 2002), Metwalli (Metwalli et al, 1998), Adelmir (Adelmir et al, 1994) e Amoako-Gyampah (Amoako-Gyampah, 1999).

Amoako-Gyampah apud Meredith (1999) realiza uma avaliação do tempo de ocorrência de falha e das condições de operação dos equipamentos. Para isso, assumiu como hipótese que os equipamentos operariam apenas 80% do tempo máximo possível.

Isto foi feito, pois o trabalho baseou-se em dados de campo que dificilmente apresentam informações bem definidas (tempo de operação, ações de manutenção, etc.).

Para os dados coletados, o autor assumiu a distribuição de Weibull como a mais adequada (como Yan-Qiao et al) para equipamentos mecânicos.

No mesmo trabalho equipamento eletromecânicos foram melhor modelados pela distribuição lognormal como foi verificado usando testes de adequação. Este estudo foi refeito abordando-se o efeito de múltiplas falhas. O trabalho ainda segue estudando da mesma forma o tempo de reparo dos equipamentos.

Os trabalhos de Metwalli et al (1998) e Adelmir et al (1994) abordam o uso da distribuição de Weibull para modelar, no primeiro um plano de manutenção de equipamentos mecânicos e no segundo a confiabilidade de tubulações em plantas nucleares.

2.2 – Ocorrência de falhas de compressores alternativos de sistemas de refrigeração

Apesar do estudo da ocorrência de falhas de compressores alternativos de sistemas de refrigeração não ser muito comum, foram encontrados na literatura alguns trabalhos que abrangem este tema, sendo que os dois mais completos foram realizados por fabricantes na forma de material de apoio ao setor de manutenção.

Como material complementar, foi incluído trechos de um boletim técnico de um fabricante de válvulas de expansão e acessórios.

Para se iniciar o estudo das falhas e modos de falhas de compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração, que de agora em diante serão referidos apenas como compressores, deve-se discutir sobre o significado do termo falha.

2.2.1 – Definição de falha

Segundo Pinto et al (2005), falha pode ser definida como “A cessação da função de um item ou incapacidade de satisfazer a um padrão de desempenho previsto”.

A definição de Mirshawka (1991) é “Falha é o fenômeno que compromete o desempenho ou impossibilita a interpretação de um item”.

Já Halm-Owoo (2002) define falha como: “uma variação não permitida das propriedades características que impedem que um sistema cumpra seu propósito definido”; ou “uma mudança indesejável que tende a mudar todo desempenho do conjunto”.

As falhas podem surgir por várias razões como:

- Erro de projeto, construção, instalação ou uso;
- Envelhecimento;
- Desgaste;
- Corrosão.

Em sistemas mecânicos, como compressores de refrigeração, as falhas são normalmente aleatórias e podem ocorrer a qualquer momento (Myrefelt, 2004).

As falhas que ocorrem em um sistema podem ser separadas em diferentes grupos com base nos seguintes termos:

- O local de ocorrência da falha;
- O projeto e uso do sistema;

- O tipo de falha;
- A natureza da falha.

Entre os trabalhos realizados, destaca-se o artigo escrito por Breuker et al (1998) sobre compressores alternativos herméticos, que mesmo sem fornecer dados quantitativos, é o mais abrangente e se fundamenta em pesquisa realizada junto a uma companhia especializada na manutenção de sistemas de refrigeração nos Estados Unidos.

Em seu trabalho, Breuker (Breuker et al, 1998) conclui que a maioria das falhas diagnosticadas em compressores alternativos herméticos são falhas do motor, mas estas falhas são geralmente o resultado de problemas mecânicos que sobrecarregam o motor. Além do mais, “a principal causa de falhas mecânicas” ou seu principal problema é o retorno do fluido refrigerante no estado líquido ao compressor.

Pela sua forma construtiva, a presença de líquido na câmara de compressão do compressor pode danificar seus componentes como válvulas, bielas, e pistões.

Se o fluido refrigerante no estado líquido estiver contido dentro do compressor durante a partida, o óleo pode ser carregado em grande quantidade para fora do compressor, resultando em uma perda de lubrificação temporária até que óleo retorne ao compressor, depois de percorrer o sistema de refrigeração.

Em manhãs com baixas temperaturas, como as que ocorrem na primavera e outono, ocorrem à condensação do fluido refrigerante dentro do bloco do compressor resultando numa partida inundada.

O contínuo retorno de fluido refrigerante no estado líquido causado pelo falta de superaquecimento também causa o resfriamento do bloco do compressor. Quando o sistema é desligado, o fluido refrigerante no estado líquido retido no bloco resfriado do compressor promove um golpe de líquido quando o compressor é ligado novamente.

Devido ao fato que muitos sistemas de climatização operam com controle do tipo liga/desliga, o sistema poderia ter inúmeros golpes de líquido durante um dia devido ao retorno do fluido refrigerante no estado líquido estar ocorrendo. Algumas das causas do retorno de fluido refrigerante no estado líquido são: falha dos ventiladores do evaporador e condensador, sobrecarga de fluido refrigerante e falha do dispositivo de expansão.

Outros motivos que levam o compressor a falhas incluem altas temperaturas de descarga do compressor e problemas de alimentação elétrica, como baixa voltagem e picos de tensão. Altas temperaturas de descarga podem ser causadas por falha dos ventiladores do condensador, falhas do condensador, restrição de líquido e falta de fluido refrigerante.

Portanto, neste trabalho, podemos identificar seis problemas que são:

- Retorno de fluido refrigerante no estado líquido;
- Perda de óleo;
- Partido inundada;
- Golpe de líquido;
- Altas temperaturas de descarga;
- Problemas de alimentação elétrica.

Prasad (2002) considerou que o retorno de líquido no compressor é o principal problema que atinge este equipamento, sendo assim realizou ensaios para determinar a gravidade deste modo de falha e suas características.

Líquido pode entrar no compressor junto com o vapor superaquecido de alimentação (ou óleo) como impureza ou pode entrar na forma de condensação no equipamento anterior como na linha de fluido refrigerante de baixa pressão ou outros processos que envolvam baixos pontos de ebulição dos fluidos, especialmente durante uma partida fria, ou pode ocorrer internamente quando o compressor trabalha com menor temperatura que o evaporador.

Em compressores alternativos, quando um grande volume de líquido surge dentro do cilindro, o pistão não consegue expeli-lo pela válvula de descarga durante um pequeno período de tempo quando ele é aberto, criando assim uma pressão excessiva no interior do cilindro. Esta pressão excessiva no cilindro impõe excessivas cargas no pistão, que irá transmiti-la através da biela, virabrequim, etc. até o mancal principal, até que um dos componentes não agüente e falhe. A seriedade deste evento transitório depende do projeto do cilindro, particularmente do volume da câmara e da taxa de compressão, e da natureza do líquido que adentra na câmara. Isto ocorre, pois, sendo o líquido dentro do cilindro muito mais denso que o gás, ele tende a se acumular próximo a válvula de descarga, gerando uma carga grande e assimétrica durante a compressão nesta lateral do pistão, que pode gerar a falha do pistão e biela.

A respeito da seriedade da natureza dos efeitos do líquido dentro do cilindro do compressor quanto à confiabilidade e desempenho, a atenção dada por Prasad (2002) é mínima.

O trabalho realizado pela Copeland (2004), um grande fabricante do setor, para esclarecer alguns pontos quanto à origem da maioria dos modos de falha em compressores, constatou que os modos de falha são deficiências do sistema ou projeto. Portanto, quando

uma falha não é encontrada e o compressor é apenas substituído, é muito provável que o mesmo problema ocorra novamente.

Neste trabalho verifica-se que a grande parte das falhas elétricas é ocasionada por falhas mecânicas, sendo assim os problemas principais são os de origem mecânica, não sendo descritos modos de falha de origem elétrica.

Fazem parte do escopo deste trabalho os compressores alternativos semi-herméticos refrigerados pelo ar e pelo próprio fluido refrigerante.

Os problemas principais de compressores alternativos apresentados são:

Retorno de Fluido Refrigerante Líquido. Ocorre com o compressor em operação no qual o fluido refrigerante líquido se mistura com o lubrificante, alterando sua capacidade de lubrificação. Este problema se apresenta tanto em compressores resfriados a ar como em compressores que usam o fluido refrigerante como arrefecimento. No primeiro caso, devido a sua forma construtiva, tem-se desgaste e pode-se gerar um golpe de líquido. Este problema não ocorre no segundo tipo de compressor, onde o fluido refrigerante que retorna ao compressor se aloja no fundo do cárter do compressor. A bomba de óleo succionará uma mistura de óleo rica em fluido refrigerante e a bombeará para as buchas dos mancais do virabrequim as quais se encontram aquecidas. O calor vaporizará o fluido refrigerante presente na mistura, eliminando o filme de óleo lubrificante, o que acarretará o contato de metal contra metal e o conseqüente desgaste. Este desgaste se manifestará de forma progressiva, tornando-se mais pronunciado nas buchas dos mancais próximas ao estator, as quais estão mais aquecidas.

Partida inundada. Migração de fluido refrigerante na fase vapor para o cárter do compressor desligado por tempo prolongado. O fluido refrigerante em estado de vapor é capaz de migrar naturalmente para o cárter do compressor, independentemente de existir um diferencial de pressão, enquanto o compressor estiver operando em uma temperatura mais baixa que o evaporador. O vapor superaquecido misturar-se-á então com o lubrificante até saturá-lo. No momento da partida, a diminuição brusca de pressão no cárter provocará uma evaporação violenta que alterará as condições normais de lubrificação.

Dessa forma, os componentes não podem ser convenientemente lubrificados durante a partida, até que desapareça a turbulência causada pela evaporação do fluido refrigerante.

Golpe de Líquido. Ocorre quando um compressor tenta comprimir fluido refrigerante no estado líquido, óleo ou uma mistura de ambos. A causa desta falha se deve a presença de líquido (óleo, fluido refrigerante) durante a fase de compressão.

Superaquecimento excessivo. É gerado diante de uma elevada temperatura na descarga do compressor. As temperaturas de descarga elevadas afetam a viscosidade do óleo e inclusive podem carbonizá-lo. A diminuição na viscosidade do óleo ocasionará uma diminuição da resistência da película lubrificante, a qual pode chegar a romper-se e permitir o contato de metal contra metal, com o conseqüente desgaste.

Perda de Lubrificação. Ocorre quando o lubrificante não retorna ao cárter do compressor. A causa desta falha pode ser originada por uma má disposição dos sifões de óleo na saída dos evaporadores ou no início de tubulações ascendentes da linha de sucção, falta de inclinação da linha de sucção em direção ao compressor ou inclinação no sentido oposto em tubulações horizontais, desenho ou seleção errônea do diâmetro da linha de sucção, perdas de fluido lubrificante, operação em ciclos curtos de partida.

Falta de lubrificação. Ocorre quando o lubrificante se encontra no cárter do compressor, porém não lubrifica. Isto pode ocorrer quando o óleo se encontra misturado com fluido refrigerante no estado líquido no cárter devido a um retorno de fluido refrigerante no estado líquido ou a uma migração de fluido refrigerante na fase de vapor.

Também poderá manifestar-se quando a viscosidade do lubrificante for afetada por um aumento excessivo de temperatura devido a um possível superaquecimento excessivo do fluido refrigerante.

Foram analisados mais alguns artigos que utilizam as mesmas divisões e conceitos que os apresentados pela Emerson Climate Technologies (Copeland), a saber: Jourdan (2004), Checket-hanks (2003A), Gauge (2003), Tomezyk (2003A), Tomezyk (2003B), Schaub (2001), Ar conditioning, heating e refrigeration news (2000) e Nohle (1999).

Os trabalhos de Jourdan e Checket-hanks (2003A) se referem os modos de falha de forma geral, Schaub e o trabalho publicado pelo periódico Ar conditioning, heating e refrigeration news tratam dos efeitos da perda de óleo, Gauge e Tomezyk (2003B) escrevem sobre o retorno de refrigerante líquido, em quanto Tomezyk (2003A) comenta sobre os danos causados pelo golpe de líquido.

Destes artigos analisados, deve-se ressaltar que o artigo de Nohle (1999) apresenta estudo sobre a queima de motores elétricos por superaquecimento excessivo. Neste trabalho se conclui que quando o fluido refrigerante atinge temperaturas muito elevadas, seu “ponto de quebra” pode ser atingido, ou seja, ocorrem mudanças nas propriedades do fluido refrigerante. Isto pode ser explicado, pois o fluido refrigerante usado (HCFC – 22) contém cloro e flúor na sua composição, que quando expostos a altas temperaturas pode formar ácidos hidrocloreídrico e hidrofluorídrico, que são corrosivos e podem atacar o

isolamento do enrolamento do motor. O resultado é um aumento na corrente elétrica do motor para o aterramento do conjunto, resultando num aumento da corrente total consumida pelo motor. Quanto maior for o aumento da quantidade de ácidos, maior será a corrente consumida que em um processo contínuo acarretará na queima do motor.

Silva (2004) apresenta um trabalho que tem por objetivo aperfeiçoar a técnica de diagnóstico na identificação e correção dos problemas de sistemas de refrigeração e de sua aplicação. Neste manual também se conclui que o compressor raramente é o problema em sistemas que apresentam falhas.

Os problemas aqui são apresentados como:

Retorno de líquido: Surge principalmente quando o superaquecimento (que é admitido como a diferença entre a temperatura do refrigerante na sucção do compressor e a temperatura de evaporação do fluido refrigerante) do fluido refrigerante está muito baixo (indicando desta forma que o fluido não evaporou totalmente antes de adentrar o compressor). Nestas condições, o compressor pode succionar não só fluido refrigerante no estado de vapor superaquecido, mas também no estado líquido. Sendo assim, devido ao efeito detergente do fluido refrigerante, ocorre à remoção de toda a película de lubrificação das partes móveis do compressor, como consequência provocará sua quebra mecânica.

Golpe de líquido: Dano causado pela pressão hidrostática quando o compressor tenta comprimir fluido no estado líquido, que pode ser fluido refrigerante, óleo ou uma mistura de ambos.

Problemas de lubrificação: Problemas relacionados ao desgaste excessivo causado pela falta de quantidade suficiente de óleo lubrificante nas partes móveis do compressor.

Contaminação do sistema: Material estranho resultando em desgaste específico causando dano mecânico do motor ou aquecimento.

Umidade na instalação: Formação do “cooper plating” nas partes móveis ocasionado pela ocorrência de temperaturas altas no compressor, em conjunto com a presença da mistura de umidade, fluido refrigerante e óleo que produzem reações capazes de atacar quimicamente tubulações de cobre, e principalmente os motores elétricos dos compressores herméticos e semi-herméticos. Isso ocorre principalmente nas instalações onde não foi realizada uma boa desidratação do sistema.

Sujeira da instalação: Decorrente da falta de cuidado durante a instalação do sistema, ou de qualquer outra intervenção que ocorrer. Estas sujeiras são principalmente

limalhas e óxidos de cobre e ferro, provenientes da instalação onde não foram utilizados cortadores de tubos adequados e gás de proteção durante a soldagem.

Temperatura de descarga elevada: Ocorre principalmente quando se trabalha com um valor elevado de superaquecimento do vapor superaquecido na seção de sucção do compressor, resultando-se na carbonização do óleo lubrificante e consequentemente a quebra mecânica do compressor.

Problemas elétricos: Problemas de origem exclusivamente elétrica que podem gerar falhas, como falta de fase da rede, sobre tensão, ou problemas elétricos causados por danos mecânicos, como travamento, rompimento do enrolamento do motor por choque com restos de outros danos.

Sporlan (2006) publicou em seu boletim técnico os efeitos da contaminação do sistema de refrigeração e como isso afeta principalmente o elemento de expansão. Mesmo não sendo um trabalho ligado diretamente a compressores, apresentou aspectos importantes no tocante a contaminação de sistemas de refrigeração que foi utilizado na análise de falhas desta pesquisa.

No trabalho da Sporlan é apresentado que os contaminantes são inseridos ou gerados em um sistema de refrigeração durante a instalação, manutenção ou condições operacionais inadequadas.

A contaminação por umidade é responsável pela formação de ácidos, borra de óleo, “cooperplating” e corrosão. Na presença de umidade e calor, tanto o fluido refrigerante quanto o óleo lubrificante que possuem flúor e cloro em sua formulação, podem se dissociar criando ácidos. Estes ácidos são uma das razões de queimas dos motores elétricos dos compressores, pois estes ácidos atacam o isolamento do enrolamento dos mesmos.

O material particulado, que são os óxidos metálicos, sujeira (pó), partículas metálicas, borra de óleo e resto de fluxo de solda, são responsáveis por desgaste de componentes do compressor e obstrução do dispositivo de expansão. Durante a instalação, são deixados restos devido à imprudência do instalador como: restos de solda, óxidos de cobre (falta de uma atmosfera inerte) e em particular de cobre (falta de preparação da superfície).

A borra de óleo originada na decomposição do óleo, junto com outros contaminantes como verniz e pó carbonoso, se depositam ao longo da tubulação causando restrição ao fluxo de fluido refrigerante e entupimento do elemento de expansão.

2.3 – Observações

Trabalhos de confiabilidade de equipamentos mecânicos, principalmente de equipamentos da indústria de refrigeração não são muitos, principalmente devido sua complexidade e dificuldade de se obter uma fonte de dados confiável, e se separar e organizar estes dados.

O modelo proposto na pesquisa aqui desenvolvida para compressores semi-herméticos de sistemas de refrigeração não foi encontrado diretamente em nenhum outro.

No entanto estudos mais simples foram encontrados bem como estudos mais complexos só que outros equipamentos.

A criação do FMEA completo para o uso da manutenção não foi verificada em outros trabalhos, pois usualmente é utilizado para o estudo das falhas tão somente (nos trabalhos de confiabilidade) abordando falhas, modos de falhas, causas e efeitos, enquanto o estudo das ocorrências com o uso do diagrama de Pareto foi encontrado, todavia não na análise de compressores herméticos e semi-herméticos.

O estudo da confiabilidade abordando diferentes distribuições estatísticas foi apenas encontrado em um trabalho. Constatou-se que, para os trabalhos analisados, o tratamento e posterior análise eram realizados apenas com o uso da regressão linear como parâmetro para seleção da distribuição mais adequada.

No presente trabalho, a regressão linear é utilizada num primeiro momento para a seleção da distribuição mais adequada, junto com métodos de verificação (como o coeficiente de correlação) para depois se estimar os parâmetros com o método da máxima verossimilhança.

No entanto muitos trabalhos abordam pontos como tempo de reparo e custo de operação e manutenção, que por dificuldade de se obter dados adequados para o equipamento aqui analisado não serão abordados.

3. - CONCEITOS BÁSICOS DE CONFIABILIDADE

O mundo está passando por mudanças de tecnologia cada vez mais rápidas. Este rápido desenvolvimento, aliado com o crescente aumento da produção, tem como consequência o aumento da competição em escala mundial acarretando em um aumento nos padrões de consumo e segurança.

Neste contexto, as empresas se empenham cada vez mais para desenvolver sistemas de gestão suficientemente fortes e flexíveis que lhes permitam produzir mais e com maior qualidade, sem com isso aumentar os seus custos.

O conceito de confiabilidade se encaixa neste meio, pois a confiabilidade de um produto tem, sob diversos aspectos, impacto na satisfação do consumidor, aparecendo em muitos casos de maneira inconsciente durante a compra.

A confiabilidade também influi diretamente na produção, onde o tempo de parada por quebras, desgaste e regulagens de equipamentos influenciam o custo final do produto ou serviço, onde a manutenção tem papel essencial.

Com sistemas de refrigeração e climatização não é diferente, pois é um meio cada vez mais competitivo, onde de forma geral não se trabalha com equipamentos sobressalentes, e as paradas inesperadas causam perdas de produtos, elevado desconforto térmico, quando não param toda uma produção, pois estes equipamentos fazem parte da linha ou, de forma indireta, atuam na segurança dos funcionários e usuários.

Um fator essencial para uma definição lógica para qualquer conceito ou ferramenta são precisão e clareza. Com a confiabilidade não é diferente, pois segundo Carter (1986) a definição utilizada por instituições respeitáveis é uma forma de se conseguir confiabilidade e não defini-la.

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" (Carter, 1986).

US military handbook (1970): "A probabilidade que um item irá executar sua função sobre determinadas condições e durante um determinado período de tempo" (Carter, 1986).

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” (Carter, 1986).

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.

3.1 - Histórico

De acordo com Marais et al (2006), Samuel T. Coleridge foi o primeiro a utilizar o termo “confiabilidade” quando, em 1816, escreveu em uma carta para um amigo, “ele inspira confiança em todos a sua volta, que estão ligados a ele e com perfeita consciência, (se tal palavra pode ser usada) com absoluta confiabilidade”.

Na década de 30, quando não se utilizava o termo confiabilidade, as primeiras publicações sobre o uso de ferramentas estatísticas para incrementar a qualidade na produção foram feitas por Walter Shewhart, engenheiro dos laboratórios Bell, todavia a comunidade da época não deu a devida importância.

Antes da Segunda Guerra Mundial, o conceito de qualidade e produção em massa já estava implantado, mas por causa do emprego de um precursor dos equipamentos eletrônicos, a válvula ou tubo de vácuo (criado por Lee Forest em 1906), uma mudança foi necessária, pois, durante a guerra, foi notado que as válvulas falhavam cinco vezes mais que os demais equipamentos, incentivando o início de diversos estudos nesta área. Estes estudos, que continuaram após o término da guerra, podendo ser considerados o início do estudo da confiabilidade como conhecemos hoje.

Em 1952, foi criada, nos Estados Unidos a AGREE, que era uma associação do Exército com os fabricantes de equipamentos materiais eletrônicos. Em um relatório publicado em 1957 são especificados os usos, aplicações e demonstrações da confiabilidade, que, com isso, passou de um conceito para um método.

Paralelamente, ainda no começo dos anos 50, tanto o Exército quanto a Marinha dos Estados Unidos seguiram com estudos cada vez mais profundos para resolver os problemas de confiabilidade das válvulas. Nesta época, a Marinha contratou a ARINC

(Aeronautical Radio Inc.) para analisar seus dados de campo enquanto o Exército contratou a Universidade de Cornell.

Em 1954, ocorre a primeira conferência de controle de qualidade e confiabilidade e começa a ser publicado o jornal “IEEE Transactions on Reliability” que apresenta estudos de casos e técnicas de projeto para incrementar a confiabilidade.

Já em 1956, a Radio Corporation of America, o maior produtor de válvulas dos Estados Unidos, publicou o relatório conhecido como TR-1100, que apresenta modelos analíticos para a estimação da taxa de falha de equipamentos e que acabou sendo o precursor da Military Standard MH-217 de 1961.

Durante os anos 60, os esforços foram voltados para sistemas complexos como os de armas (Aeronáutica) e nos programas espaciais Mercury, Gemini e Apollo.

Ainda nos anos 60, foi criado, pela Federal Aviation Administration, um grupo para estudo e desenvolvimento de um programa de confiabilidade para a indústria aeronáutica (Pinto, Xavier; 2005). Das várias conclusões atingidas 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 não é eficaz.

No final desta década, as válvulas estavam sendo quase que totalmente substituídas por outro componente da eletrônica, o transistor.

Nos anos 70, o estudo da confiabilidade seguiu em três frentes: segurança, no caso de sistemas que envolviam grandes riscos como usinas nucleares, confiabilidade de programas (software) e em contratos de garantia de produtos, este último foi experimentado com sucesso pelo sistema de compras do governo dos Estados Unidos.

3.2 - Funções de confiabilidade e taxa de falha

Considerando a probabilidade como integrante da confiabilidade. É necessário se destacar alguns elementos importantes (Carter, 1986):

- a) Um desempenho especificado é esperado.
- b) Ele é esperado apenas em determinadas condições de uso.
- c) Ele é esperado durante um período de tempo determinado.
- d) E a confiabilidade neste período é expressa como uma probabilidade.

Estes elementos estão listados de forma a favorecer o tratamento dos dados e cada um deles pode abranger uma grande variedade de interpretações.

Para se poder ter uma estimativa da proporção total de itens que falham ao longo do tempo até a falha do último item, recorre-se a distribuição acumulada $F(t)$, onde:

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

Sendo que $R(t)$ é a função probabilidade acumulada da ocorrência de sobreviventes (equipamentos que não falharam), probabilidade de sucesso ou confiabilidade.

Na sua forma mais elementar a taxa de falha é a taxa em que cada falha ocorre no tempo, e pode ser expressa na forma:

$$\frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

No entanto é usual expressar a taxa de falha $\lambda(t)$ como uma proporção da população de equipamentos sobreviventes no instante que a taxa se refere:

$$\lambda(t) = \left\{ \frac{dF(t)}{dt} \right\} / R(t). \quad (3)$$

Onde $R(t)$ é a proporção da população inicial que não falhou até o momento t .

$$\frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}. \quad (4)$$

$$\lambda(t) = - \left\{ \frac{dR(t)}{dt} \right\} / R(t) \quad (5)$$

Como $\lambda(t)$, $R(t)$ e $F(t)$ são normalmente valores que variam com o tempo, o símbolo (t) enfatiza o fato que cada uma das funções é função do tempo, mas deve ser omitido quando a função não varia no tempo.

A função densidade de probabilidade $f(t)$ é dada por:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (6)$$

Que é uma taxa definida, sendo que a proporção total esperada de falhas, acumuladas, no intervalo $T1$ a $T2$ é dada por:

$$\int_{T1}^{T2} \left\{ \frac{dF(t)}{dt} \right\} dt \text{ ou } \int_{T1}^{T2} f(t) dt \quad (7)$$

Tal definição é importante na aplicação dos conceitos da estatística na confiabilidade.

A importância real da taxa de falha, $\lambda(t)$, pode ser demonstrada pelo produto de $\lambda(t)\delta t$ onde δt é um pequeno intervalo de tempo. Aplicando isto na equação (3) temos:

$$\frac{\delta F(t)}{R(t)} = \lambda(t)\delta t. \quad (8)$$

Este produto representa:

- a) A proporção de sobreviventes em um momento t de uma grande população inicial que falha no próximo intervalo δt ; ou:
- b) A proporção esperada de sobreviventes de uma amostra que falha no próximo intervalo δt ; ou:
- c) A probabilidade que um item individual que sobreviveu até o momento t irá falhar durante o próximo intervalo δt .

Em seu livro, Carter (1986) adota a Eq. (5) como sendo a de melhor entendimento por aqueles que não estão familiarizados com o assunto.

A relação entre a função densidade de probabilidade $f(t)$ e a função confiabilidade $R(t)$ fica:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (9)$$

3.2.1 - Curva da Banheira

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.02). 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.

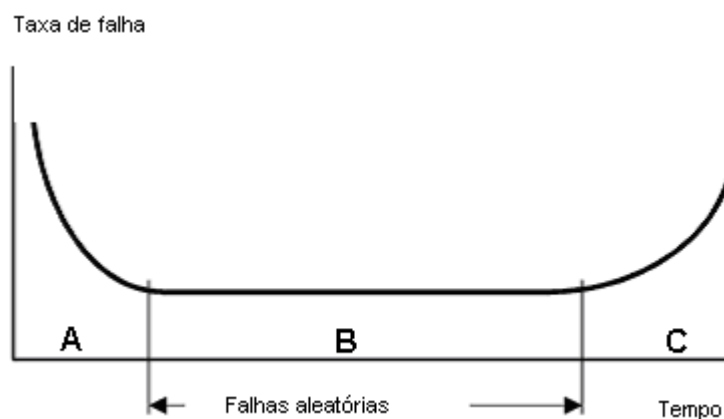


Figura 02 – Curva da banheira.

A curva da banheira apresenta três períodos distintos:

- A. Mortalidade infantil: Há grande incidência de componentes com erro de aplicação ou erro de instalação. A taxa de falha decai com o tempo.
- B. 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.
- C. Envelhecimento ou degradação: Há um aumento da taxa de falha decorrente do desgaste natural (atrito, 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.

3.2.2 - Distribuições de probabilidade

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.

Para se definir a função densidade de probabilidade é necessário se conhecer algumas propriedades que definem o comportamento da variável aleatória em estudo.

Começamos definindo a variável aleatória X e os seus valores que podem ser especificados como x . As propriedades da variável aleatória são tratadas em termos de probabilidade. A primeira das principais probabilidades utilizadas para uma variável aleatória, onde $F(x)$ é a função distribuição acumulada de x é:

$$F(x) = P\{X \leq x\}, \quad (10)$$

A equação (10) indica a probabilidade de X ter um valor igual ou menor que x .

A equação (11) permite determinar a probabilidade com que X varia entre x e $x+\Delta x$:

$$f(x)\Delta x = P\{x \leq X \leq x+\Delta x\}, \quad (11)$$

Sendo $f(x)$ a função densidade de probabilidade de x . Como $f(x)$ e $F(x)$ são probabilidades, ambas devem ser maiores que 0.

Estas duas funções de X são relacionadas e como x pode assumir valores entre $-\infty \leq X \leq +\infty$. A função distribuição acumulada é a integral da função densidade de probabilidade para $X \leq x$.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x') dx'. \quad (12)$$

Invertendo esta expressão e diferenciando obtemos:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x). \quad (13)$$

As distribuições de probabilidade $f(x)$ e $F(x)$ são normalizadas como segue: primeiro verifica-se que a variável X varia entre a e b como na expressão:

$$\int_b^a f(x)dx = P\{b \leq X \leq a\}. \quad (14)$$

Agora, X deve assumir valores entre $-\infty$ e $+\infty$.

$$P\{-\infty \leq X \leq +\infty\} = 1. \quad (15)$$

A combinação das equações (14) e $b = -\infty$ e $a = +\infty$ leva a:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1. \quad (16)$$

Normalmente não é necessário ou possível se conhecer os detalhes da função densidade de probabilidade de uma variável aleatória. Em muitos casos, basta conhecer algumas de suas propriedades; sendo as duas mais importantes a média e a variância.

A média de x é definida como:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (17)$$

E a variância pode ser definida como:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx. \quad (18)$$

A variância é a medida da dispersão dos valores sobre a média.

Além da média e da variância, outras duas propriedades podem ser utilizadas para a função densidade de probabilidade, que são os coeficientes de assimetria e de Kurtosis.

O coeficiente de assimetria é definido como:

$$sk = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x)dx. \quad (19)$$

Este coeficiente é a medida da assimetria da função densidade de probabilidade na média.

E o coeficiente de Kurtosis é definido como:

$$ku = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^4 f(x)dx. \quad (20)$$

O coeficiente de Kurtosis é a medida da dispersão da função densidade de probabilidade sobre a média.

Em estudos de confiabilidade, segundo Carter (1986), os principais modelos de distribuição de probabilidade utilizados são normal, lognormal, exponencial e Weibull.

Freitas et al (1997) não utiliza em seu trabalho a distribuição normal e aplica a distribuição de Pareto não como uma distribuição de probabilidade e sim como mais uma ferramenta da qualidade. Diferentes autores ainda ressaltam outras distribuições como Lewis (1996) apresenta a distribuição Dirac Delta e de Poisson e O'Connor (2002) apresenta as distribuições gama e X^2 .

3.2.2.1 - Distribuição Normal

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, suas propriedades e aplicações são muito bem cobertas pelos livros de estatística (Carter, 1986).

A função densidade de probabilidade nesta distribuição é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (21)$$

Onde σ é o desvio padrão da população, μ a média e t seguindo a prática padrão é o tempo. A função distribuição acumulada define-se como:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt. \quad (22)$$

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt. \quad (23)$$

A taxa de falha é definida como:

$$\lambda(t) = \frac{\exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma \sqrt{2\pi} - \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt}. \quad (24)$$

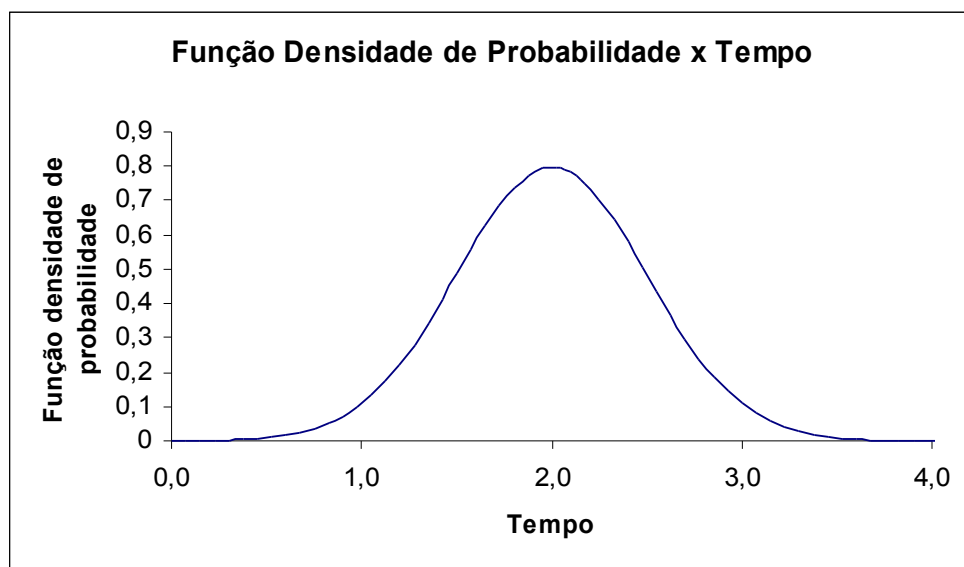


Figura 3 – Função densidade de probabilidade da distribuição normal.

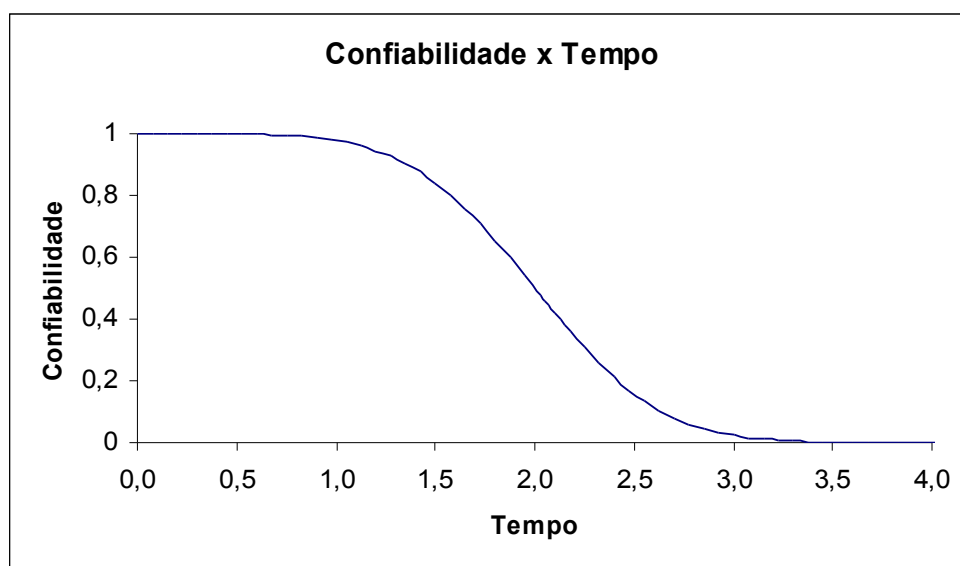


Figura 4 – Função Confiabilidade da distribuição normal.

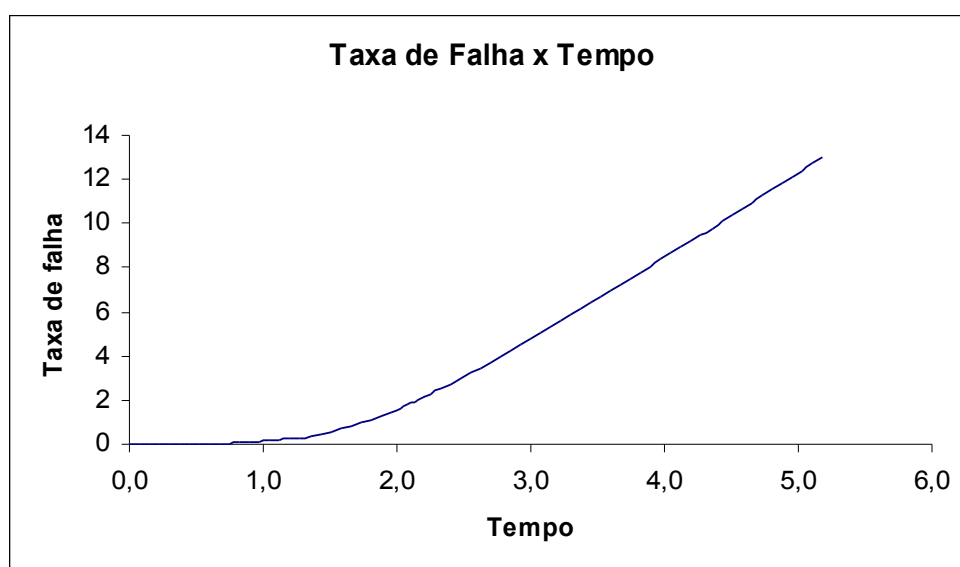


Figura 5 – Função Taxa de Falha da distribuição normal.

3.2.2.2 - Distribuição exponencial

A distribuição exponencial representa uma situação onde a taxa de falha é constante. Isso pode ser expresso matematicamente como:

$$\lambda(t) = \text{constante} = \lambda \quad (25)$$

Onde a constante λ é medida em $(\text{tempo})^{-1}$. A função confiabilidade é definida como:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (26)$$

A função distribuição acumulada define-se como:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (27)$$

Assim a função densidade de probabilidade fica:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (28)$$

Segundo Carter, as Eqs. (27) e (28) definem a distribuição exponencial negativa.

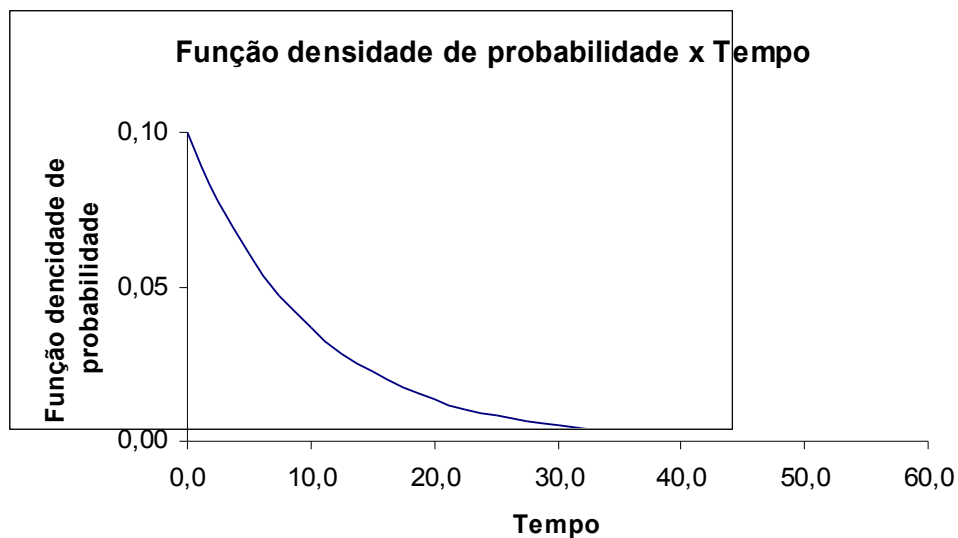


Figura 6 – Função densidade de probabilidade da distribuição exponencial.

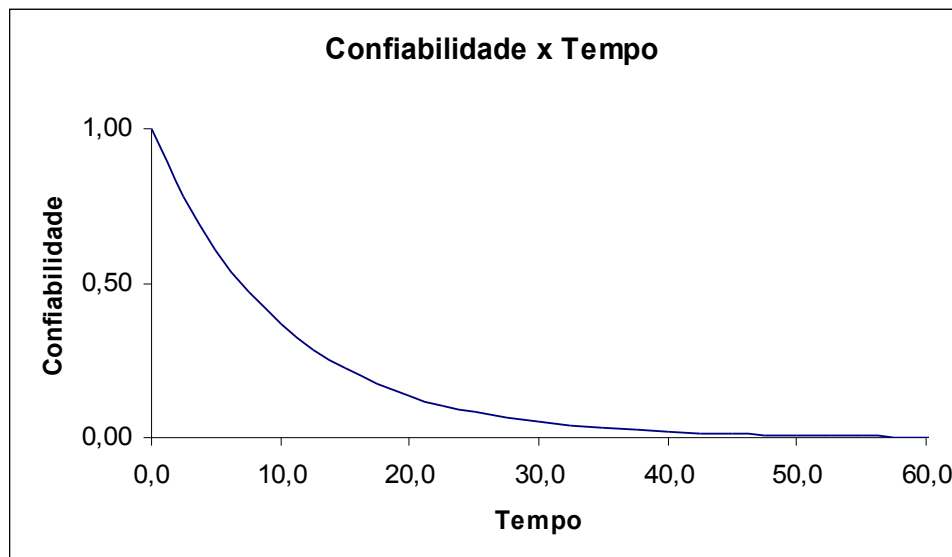


Figura 7 – Função Confiabilidade da distribuição exponencial.

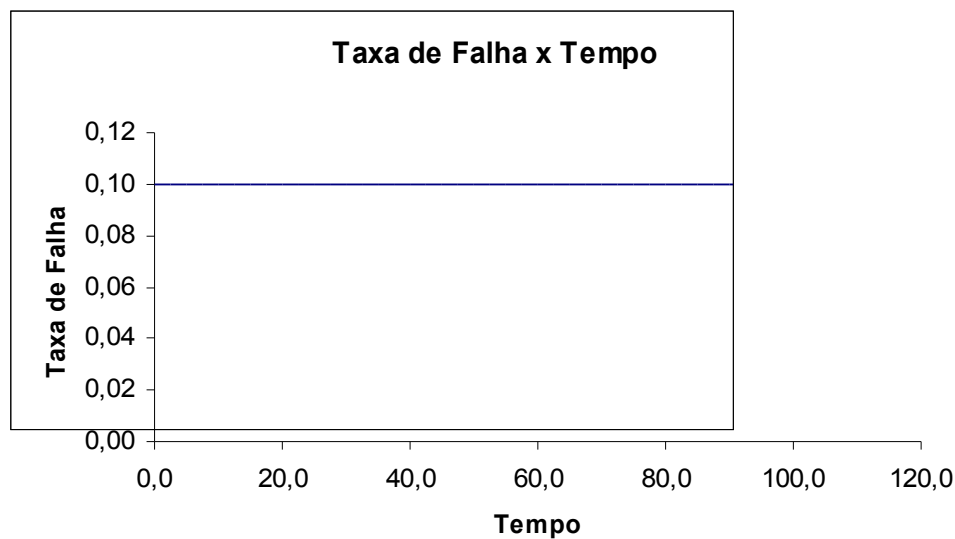


Figura 8 – Função Taxa de Falha da distribuição exponencial.

Esta distribuição representa a faixa das falhas aleatórias da curva da banheira (vide Fig. 2), 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 (1986) considera que o comportamento de equipamentos (componentes) eletrônicos segue esta distribuição ao longo da vida.

3.2.2.3 - Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal 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 (1986) esta distribuição é a que melhor define o comportamento de equipamentos mecânicos sobre a ação de fadiga.

Na distribuição lognormal a função densidade de probabilidade é definida como:

$$f(t) = \frac{1}{\alpha t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\log t - \log t_0}{\alpha} \right)^2 \right\}. \quad (29)$$

Onde α é o desvio padrão do logaritmo de t , t_0 é a mediana de t e t é o tempo de falha.

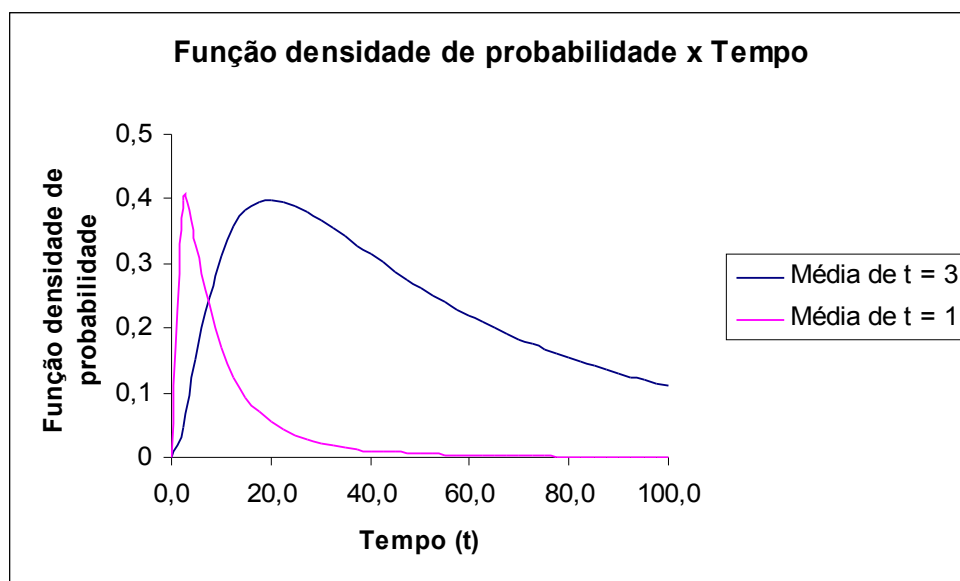


Figura 9 – Função densidade de probabilidade da distribuição Lognormal.

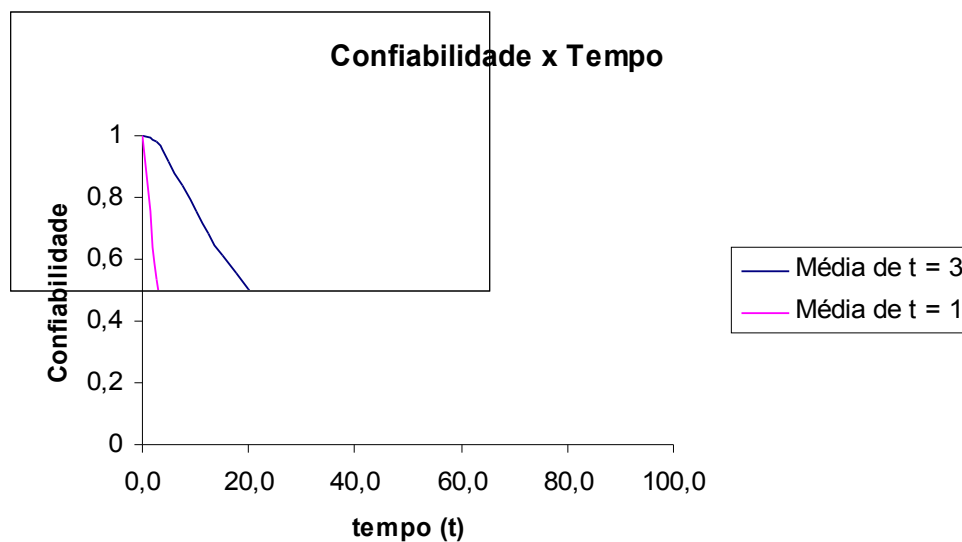


Figura 10 – Função Confiabilidade da distribuição Lognormal.

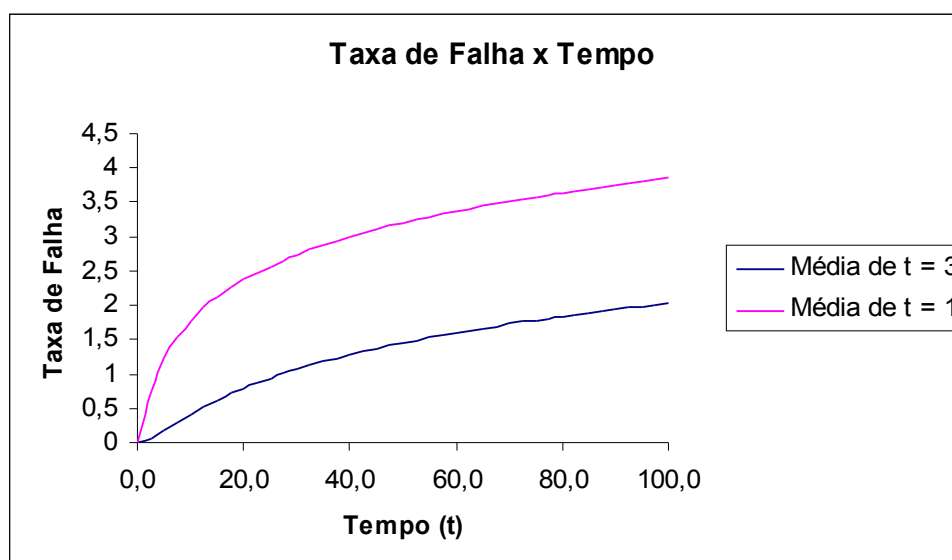


Figura 11 – Função Taxa de Falha da distribuição Lognormal.

3.2.2.4 - Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull 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 (vide Fig. 20). 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”.

Para esta distribuição temos que:

$$\lambda(t) = \frac{-\frac{d}{dt}[R(t)]}{R(t)} \quad (30)$$

Que integrando:

$$R(t) = \exp\left[-\int \lambda(t)dt\right] \quad (31)$$

A expressão empírica que Weibull sugeriu em 1951 é dada por:

$$\int \lambda(t)dt = \left(\frac{t-t_o}{\eta}\right)^\beta \quad (32)$$

então:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_o}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (33)$$

Rearranjando estas expressões temos:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_o}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (34)$$

A função densidade de probabilidade pode ser escrita como:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_o}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-t_o}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (35)$$

E a função taxa de falha:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\left(\frac{t - t_o}{\eta} \right)^{\beta-1} \right]. \quad (36)$$

Nas Eqs. (33), (34) e (35) só se deve aplicar valores de $(t - t_o) \geq 0$. Para valores de $(t - t_o) < 0$, $f(t)$ e $\lambda(t)$ são zero, onde:

- t_o é a constante de localização que define a origem da distribuição.
- η é a constante de escala, que estica a distribuição ao longo do eixo do tempo.
- β é a constante de forma, que primariamente controla a forma da curva.

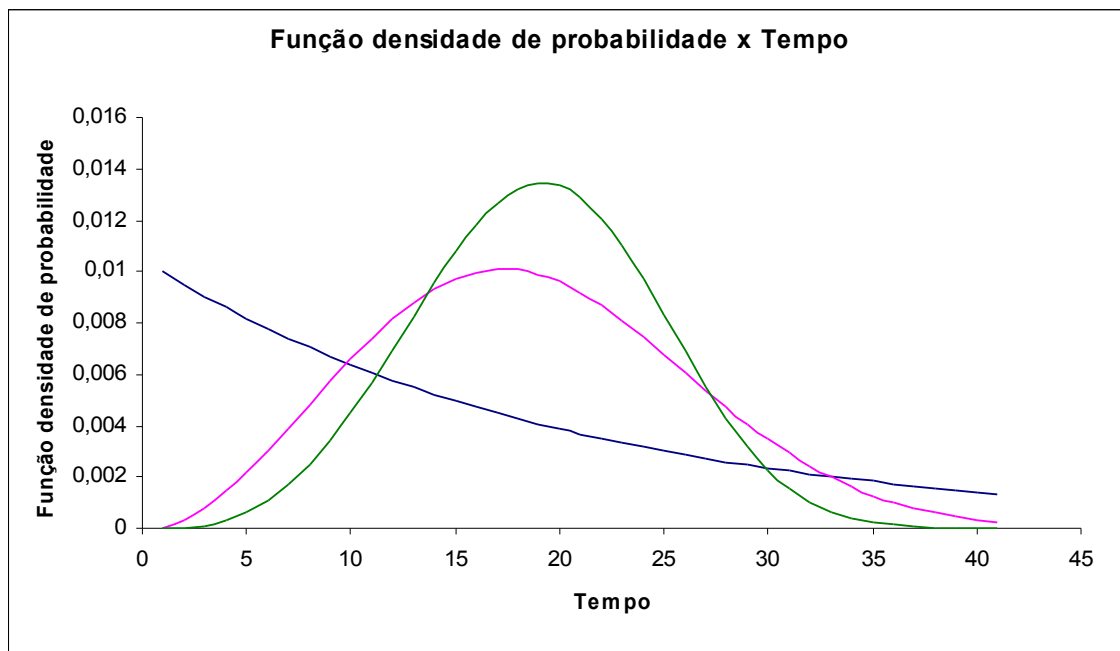


Figura 12 – Função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.

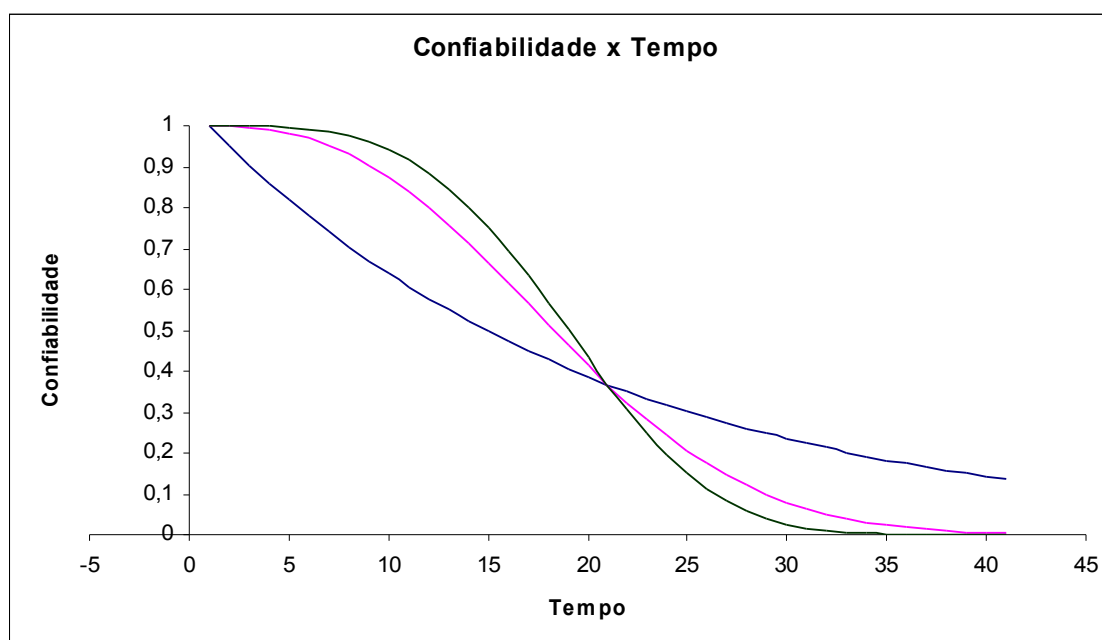


Figura 13 – Função confiabilidade da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.

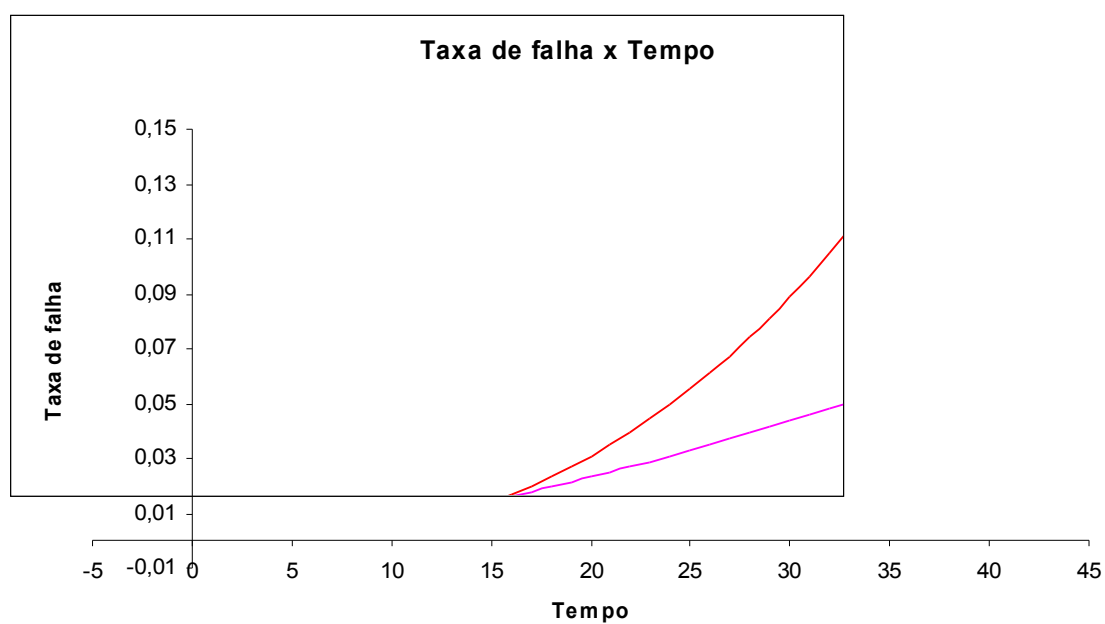


Figura 14 – Taxa de falha da distribuição de Weibull com β de 1 a 3,5.

3.2.2.5 - Teste de adequação

Para a escolha da distribuição mais adequada para um determinado teste de confiabilidade, pode-se empregar métodos estatísticos. O'Connor (2002) separa em três

testes de adequação para verificar a distribuição mais adequada, ou seja, X^2 (ou chi-quadrado), Kolmogorov-Smirnov e mínimos quadrados.

Um teste versátil e comumente utilizado é o teste X^2 já que ele pode ser igualmente aplicado para qualquer distribuição escolhida, desde que se possua um considerável número de amostras disponíveis. Para se conseguir precisão, é necessário que se possua pelo menos três classes de amostras, com pelo menos cinco amostras em cada uma.

A base para este método é a hipótese que, se uma amostra for dividida em “ n ” classes, então os valores de cada classe serão normalmente distribuídos em sobre o valor esperado, se a distribuição escolhida for correta.

A expressão para o calculo do X^2 pode ser expressa como:

$$X^2 = \frac{(x_i - E_i)^2}{E_i} \quad (\text{com } n - 1 \text{ graus de liberdade}). \quad (37)$$

onde:

x_i = Classificação do valor acumulado;

E_i = Classificação do valor estimado acumulado para a distribuição assumida;

Caso a distribuição X^2 apresente um valor elevado (fora do percentil de 90%), ela tende a resultar de uma hipótese duvidosa. Neste caso, esta hipótese é normalmente descartada quando o grau de confiança se apresenta menor que o desejado. Sendo o valor da distribuição inferior a este valor, a informação fornecida é insuficiente para rejeitar uma suposta distribuição de dados (O’Connor, 2002).

Outro teste de adequação, comumente utilizado na confiabilidade é o teste de Kolmogorov-Smirnov ($K-S$). Ele é tão simples quanto o teste X^2 e pode chegar a melhores resultados com um pequeno número de amostras.

Também é conveniente utilizá-lo em conjunto com suas tabelas probabilísticas, desde que ele seja baseado em uma classificação acumulada de informações. O procedimento segue a seguinte seqüência:

1. Construir as tabelas para o calculo de $(x_i - E_i)$;
2. Determinar o maior valor;
3. Comparar este valor com o adequado de $K-S$ (tabela de probabilidade).

O teste de adequação dos mínimos quadrados é usado para medir a correlação linear da amostra com a equação da reta que melhor se ajusta com os dados inseridos. A linha que melhor se ajusta aos dados é chamada linha de regressão, e o coeficiente de adequação que melhor se ajusta é chamado de coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação é dado por:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}. \quad (38)$$

Onde as variâncias da amostra são:

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (39)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (40)$$

sendo: $\bar{x}$ = média da variável x .

y = função de x .

A covariância é dada por:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \quad (41)$$

Onde x_i e y_i são as coordenadas da curva e a curva de regressão é dada por:

$$y - \bar{y} = \frac{S_{xy}}{S_x^2} (x - \bar{x}) \quad (42)$$

Se r for positivo isso indica que os dados são correlatos com uma curva de regressão crescente e o inverso também é válido. Se $|r|=1$, a correlação é perfeita e todos os pontos se encaixam na curva de regressão. No caso de $r = 0$, as variáveis não são linearmente correlatas.

O coeficiente R^2 (r^2) é comumente usado ao invés de r para indicar correlação, pois ele se apresenta como uma forma mais precisa, particularmente com curvas probabilísticas, e é chamado de coeficiente de correlação.

A regressão linear pode ser utilizada para dados que não são linearmente correlacionados se os eixos forem transformados para linearizar a equação. Este método também pode ser usado para avaliar o ajuste de adequação de curvas em papéis de probabilidade, que são folhas graduadas (quadriculadas) em função da distribuição desejada, utilizadas para simplificar o uso das distribuições estatísticas.

3.3 - Testes de confiabilidade

Testes de confiabilidade podem ser divididos em dois grupos: os testes paramétricos e não paramétricos.

Os testes não paramétricos são aqueles onde os dados são analisados de forma direta sem o uso de nenhuma distribuição estatística em particular. Esta análise é válida por permitir entender e visualizar o comportamento a confiabilidade. Segundo Lewis (1986), eles também servem como um primeiro passo para a tomada de decisão entre a escolha da distribuição de testes paramétricos, fornecendo uma indicação visual de qual distribuição é mais adequada.

Tanto os testes paramétricos quanto os testes não paramétricos podem ser divididos em mais duas classes, ou seja, dados agrupados e não agrupados. Dados agrupados consistem em um determinado número de itens falhos, e o tempo de falha separado por períodos, de forma que não se conhece o tempo exato até a falha. Já os dados não agrupados consistem em um número de itens e o tempo até a falha de cada um deles.

Dados não agrupados são típicos resultados de laboratório onde as amostras não são grandes, mas as pessoas ou instrumentação são capazes de gravar o tempo exato até a falha. Grandes amostras estão geralmente à disposição para testes (principalmente equipamentos eletrônicos), mas nem sempre é viável se providenciar instrumentos para gravar o tempo até a falha de todos. Uma forma de se resolver este problema é parando o teste em intervalos e anotando-se os equipamentos que falharam.

Grandes amostras também podem vir de dados de campo, mas geralmente, são constituídas de relatórios de manutenção ou bancos de dados de empresas. Estes dados agrupados ou não normalmente precisam ser pré-analisados para se determinar o tempo de funcionamento até a falha.

Para O'Connor (2002), os testes não paramétricos podem ser usados como testes rápidos por serem matematicamente simples, antes de estudos mais detalhados, principalmente antes de se selecionar uma distribuição de probabilidade para análise de falhas.

Dados não agrupados consistem numa série de tempos de falha $t_1, t_2, \dots, t_n$ para N unidades em teste. Na nomenclatura estatística t_i se refere à classificação estatística do teste. A estimativa da função distribuição acumulada $\hat{F}(t_i)$ é:

$$\hat{F}(t_i) = \frac{i}{N+1} \quad (43)$$

Como a função confiabilidade e distribuição acumulada são relacionadas por $R = I - F$, a função confiabilidade estimada é:

$$\hat{R}(t_i) = \frac{N+1-i}{N+1} \quad (44)$$

As equações da média e da variância estimada ficam:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (45)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{\mu})^2 \quad (46)$$

Para se estimar a confiabilidade, taxa de falha ou taxa de risco acumulada de uma distribuição de probabilidade de uma amostra com dados agrupados inicia-se o teste pela confiabilidade. O teste começa com N itens e o número de itens sobreviventes é tabulado ao fim de cada intervalo de tempo M onde os dados são agrupados como $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_M$.

O número de itens sobreviventes é encontrado como sendo $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$. Como a função confiabilidade é definida como a probabilidade do sistema operar com sucesso pelo período de tempo t , a confiabilidade do tempo t_i é:

$$\hat{R}(t_i) = \frac{n_i}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (47)$$

Para se obter curvas dos resultados do teste agrupado, deve-se estimar a média, variância ou outra propriedade da distribuição.

A função densidade de probabilidade pode ser aproximada por um histograma, no intervalo $t_{i-1} < t < t_i$ e $f(t)$ ajustada para:

$$\hat{f}t = \frac{n_{i-1} - n_i}{N \Delta i}, \quad (48)$$

Onde o tamanho do intervalo é:

$$\Delta i = t_{i-1} - t_i, \quad (49)$$

A média fica:

$$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^M \bar{t}_i f_i \Delta i, \quad (50)$$

Onde $\bar{t}_i = 0,5(t_{i-1} + t_i)$, e a variância é estimada por:

$$\hat{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^M \bar{t}_i^2 f_i \Delta i - \hat{\mu}^2. \quad (51)$$

3.3.1 - Métodos para estimativa de parâmetros de distribuições probabilísticas

Uma análise de confiabilidade geralmente envolve modelos de distribuição que possuem um ou mais parâmetros. Os valores destes parâmetros frequentemente não são conhecidos, todavia, dados estatísticos podem fornecer uma estimativa destes parâmetros de interesse.

Modarres (1993) sugere dois métodos de determinação de estimadores: o método da máxima verossimilhança e o dos momentos.

O método da máxima verossimilhança permite uma formulação, a partir das quais será possível obter estimadores para os parâmetros de uma distribuição. Tomados os tempos $t_1, t_2, \dots, t_n$ como uma amostra de uma população de interesse, representada pela função densidade de probabilidade $f(t; \theta)$, onde θ é o parâmetro da distribuição, a função verossimilhança para uma amostra aleatória fica:

$$L(\theta; t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{i=1}^n f(t_i, \theta) \quad (52)$$

O método da máxima verossimilhança consiste em avaliar $\hat{\theta}$ como estimativa de θ . Logo para todo valor de θ :

$$L(t, \hat{\theta}) \geq L(t, \theta). \quad (53)$$

Desta forma, o único valor de θ na função $L(t, \theta)$, que satisfaz θ é o máximo valor de $L(t, \theta)$, é estipulado $\hat{\theta}$. Assim $\hat{\theta}$ é chamado de estimador máximo da verossimilhança de θ . Onde:

$$\left. \frac{\partial L(t, \theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta = \hat{\theta}} = 0, \quad (54)$$

onde $\hat{\theta}$ pode ser obtido e nota-se que a expressão (56) é equivalente a:

$$\left. \frac{\partial \ln L(t, \theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta = \hat{\theta}} = 0, \quad (55)$$

Em certos casos, a expressão (55) pode ser resolvida analiticamente sendo que, na maioria dos casos, deve ser resolvida numericamente.

O método dos momentos é baseado em equações de momentos da população para a amostra. Para uma distribuição com m parâmetros, os momentos são equacionados para gerar um sistema de m equações e m incógnitas. Este método é normalmente menos preciso que o método da máxima verossimilhança, mas ele é muito utilizado em situações que o método da máxima verossimilhança é difícil de ser aplicado.

3.3.2 - Ensaios censurados

Os testes realizados para obter as medidas de durabilidade de produtos são demorados e caros. Por serem demorados, usualmente os testes podem terminar antes de todos os itens terem falhado. Uma característica decorrente destes testes é então a presença de observações incompletas ou parciais. O resultado do teste corresponde ao número de ciclos até a falha, que é superior a um determinado número preestabelecido ou considerado e estas medidas (observações) são ditas censuradas.

Ressalta-se o fato que, mesmo censurados, todos os resultados provenientes de um teste de durabilidade devem ser utilizados na análise estatística. Duas razões justificam tal procedimento. A primeira razão nos diz que, mesmo sendo incompletos ou censurados, os dados disponíveis nos fornecem informações sobre o tempo de vida dos produtos. A segunda razão diz respeito ao efeito da omissão das censuras nos cálculos das estimativas das medidas de confiabilidade de interesse, pois se o objetivo for a obtenção da estimativa

do tempo médio até a falha de um produto, certamente obteremos um valor “viciado”, se for levado em consideração apenas as medidas não censuradas.

Alguns mecanismos de censura são diferenciados em testes de durabilidade. A censura por tempo ou do tipo I (ou pela direita), conforme apresentado na Fig. 21, pode ser caracterizado 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, e continuam operando depois do período de análise, ou são removidas do teste ou serviço porque falharam devido a uma causa diferente da simulada.

Já a censura por falha ou tipo II (ou pela esquerda), conforme apresentado na Fig. 21, é aquela em que o teste será terminado após ter ocorrido a falha um número preestabelecido de itens sobre teste.

Ensaaios censurados 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.

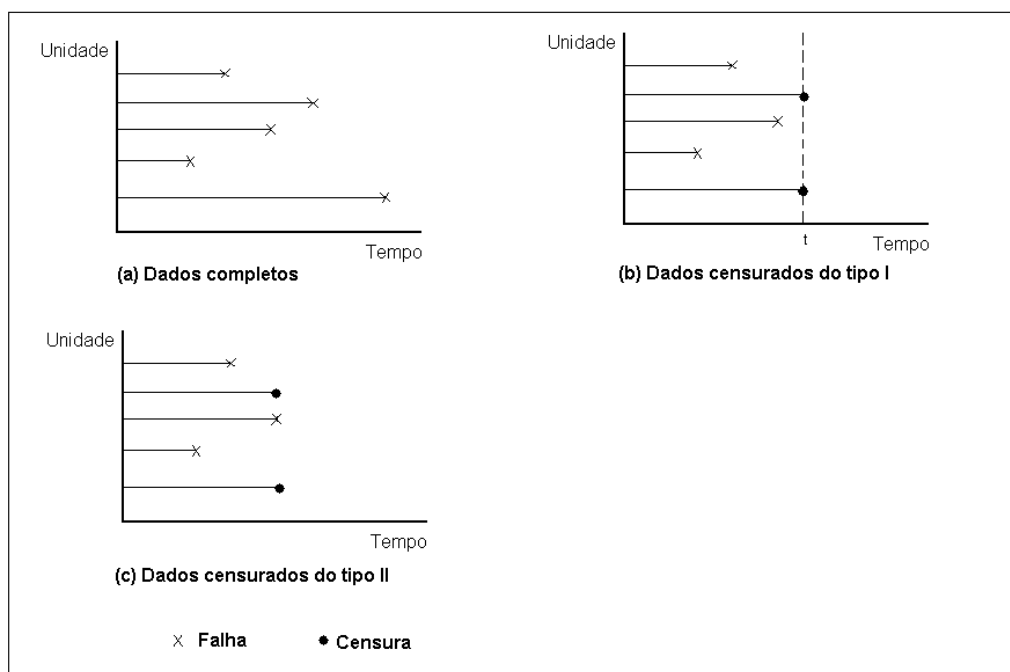


Figura15 – Tipos de dados de confiabilidade. Fonte: Freitas et al (1997).

Na prática, o tratamento estatístico de dados oriundos dos três mecanismos de censura é geralmente o mesmo. Por outro lado, existem vantagens de um tipo de relação

em comparação com outro, dependendo das condições que o teste será realizado e de informações de histórico do produto em estudo.

A censura por falha, do tipo II, é geralmente usada quando não se tem muita ou nenhuma informação sobre a durabilidade do produto em estudo. Desta forma garante-se um número mínimo de falhas para realizar uma análise estatística dos dados adequada.

A censura por tempo (tipo I), por outro lado, é geralmente utilizada em combinação com informações anteriores sobre o produto e nos permite planejar o tempo de duração do estudo.

3.4 - Análise de confiabilidade de sistemas

Aqui será apresentada uma distinção em relação aos estudos de confiabilidade citados até agora. 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 atuar na confiabilidade de um equipamento, principalmente naqueles chamados de reparáveis (vide Fig. 22) 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 operarem 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.

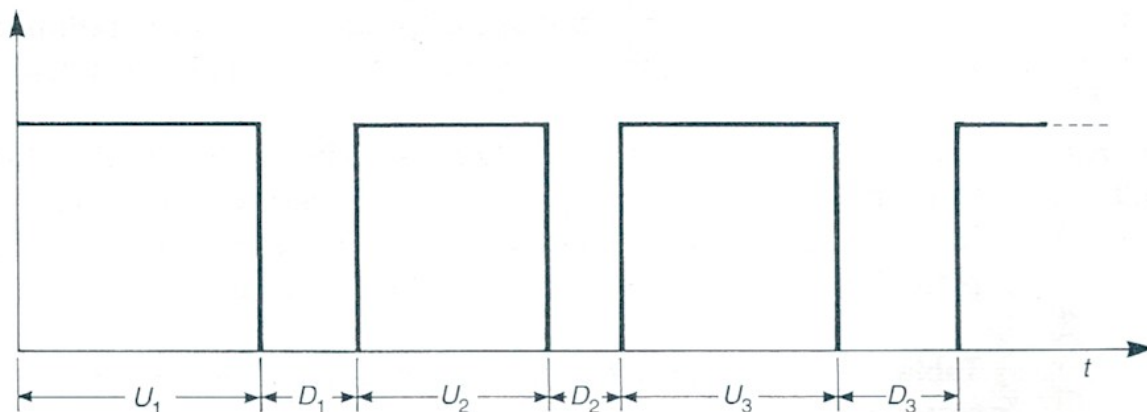


Figura 16 – Histórico de um sistema reparável. Fonte: Leitch (1995).

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.

A Fig. 22 mostra o histórico de um típico sistema reparável. Nota-se que parte da vida útil é utilizada em operação (períodos $U_1, U_2, \dots$) e outra parte o sistema está sendo reparado (períodos $D_1, D_2, \dots$). Nesta figura, pode-se observar que os tempos de reparo são diferentes, e que no caso de uma manutenção não planejada, eles também são imprevisíveis.

A disponibilidade segundo Modarres (1993) é a probabilidade de um equipamento ou componente estar funcionando como planejado, quando for necessária sua utilização. Segundo Pinto et al (2005), a disponibilidade é função da confiabilidade e da manutenibilidade.

A disponibilidade de um equipamento é composta pelo tempo disponível para produção dividido pelo tempo total, que é formado pelo tempo disponível para produção acrescido do tempo de manutenção. Portanto, quanto menor o tempo de manutenção, maior a disponibilidade de um equipamento.

Os métodos para se analisar a confiabilidade de sistemas podem variar, sendo que a seguir são apresentados alguns dos mais relevantes, a saber:

- Modarres (1993) aborda o diagrama de blocos, FMEA/FMECA e a árvore de análise de falhas (FTA).
- Leitch (1995) que realiza uma abordagem ligada ao projeto de equipamentos, utilizando a FTA e o FMEA.

- Lewis (1996), que aborda a questão da segurança, lança mão do FMEA/FMECA, árvore de eventos e FTA.
- Freitas et al (1997) aborda FMEA/FMECA e a FTA.
- Pinto et al (2005) descreve como ferramenta para análise de confiabilidade de sistemas o FMEA, as Causas raízes de falha e a manutenção centrada em confiabilidade (RCM).

Dentre estes trabalhos nota-se que os métodos que são mais utilizados na maioria das abordagens são o FMEA/ FMECA.

Deve-se observar que, para a maioria destes autores, o FMEA e FMECA são chamados de forma genérica de FMEA, pois entre estes dois métodos o único que é considerado como um método quantitativo de confiabilidade é FMECA, como já será abordado.

Segundo O'Connor (2002), o FMEA (FMECA) “é o método de análise de confiabilidade mais amplamente utilizado e de maior eficácia em uso atualmente”.

Já de acordo com Freitas et al (1997), a ligação do FMECA com a confiabilidade vem do fato desta ferramenta, juntamente com a árvore de análise de falhas (FTA), é a única técnica de confiabilidade citada textualmente pelas normas ISO 9000, em particular na norma ISO 9004, subitem 8.4 “Qualificação e validação de projeto”.

A diferença entre a análise de modos e efeitos de falha (FMEA) e a análise de modos, efeitos e criticidade de falhas (FMECA), refere-se justamente ao “C” de criticidade. Em outras palavras, este método é primeiramente um FMEA acrescido de índices de ocorrência, gravidade, facilidade de detecção e risco.

Desta forma, apesar do FMEA ser considerado um método qualitativo, o FMECA é considerado um método quantitativo de aumento da confiabilidade.

Em seguida, será explorado com mais detalhes o método do FMEA, que apesar de ser um método subjetivo e qualitativo de aumento da confiabilidade, pode ser feito com uma base de dados mais simples que a do FMECA.

3.4.1 - Análise de modos e efeitos de falha (FMEA)

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).

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 da 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 de FMEA manipula conceitos nem sempre usuais como taxas de falhas associadas a um modo de falha específico e a sua execução sempre demanda tempo e conhecimento sobre o equipamento (processo), embora sua aplicação possa ser simplificada com o uso de ferramentas computacionais (Cardoso, Souza; 2004).

Para se melhor entender a construção do FMEA, Nelson et al (1989) sugere que primeiro se divida os componentes mecânicos em classes funcionais, que podem ser de várias formas (no caso de uma câmara frigorífica, esta pode ser dividida em equipamentos de controle, elétricos e mecânicos). Depois se pode dividir o sistema no nível dos componentes (ainda em relação à câmara frigorífica, seus componentes são condensador, evaporador, compressor, elemento de expansão, isolamento, linha).

Assim as características básicas de cada componente podem ser examinadas, levando em consideração as similaridades e diferenças entre cada um deles. Neste nível, todos os componentes devem ser levados em consideração de forma flexível, analisando-se seus vários usos, para desta forma o tornar mais adaptável ao ambiente que os mesmos irão operar.

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, Souza; 2004), a saber:

- Como cada componente do sistema pode falhar (quais seus modos de falha)?
- Quais os efeitos destas falhas sobre o sistema?
- 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)?

Para iniciar o trabalho com o FMEA, ainda deve-se definir mais alguns aspectos, como:

- Quais são as funções deste equipamento, principal e secundárias?
- Quais as falhas pertinentes para este trabalho?

A análise, com base na metodologia de FMEA, fundamenta-se na execução de uma tabela, a qual apresenta um número mínimo de informações para a execução de um estudo adequado.

Usualmente na primeira coluna desta tabela apresenta-se a identificação do componente, que seria um código ou numeração indicado pelo projetista do equipamento analisado (sistema de TAG).

Na segunda coluna apresenta-se a descrição do equipamento que está sendo analisado, podendo conter ainda outras informações como localização e características adicionais.

Em uma terceira coluna descreve-se a função do componente indicando sua relação com o resto do sistema.

Na quarta coluna descrevem-se os possíveis modos de falha que podem ser apresentados pelo equipamento e em qual modo de operação do sistema (partida, uso contínuo, desligamento). Aqui o modo de falha pode ser definido como a maneira pela qual o item pode falhar (Freitas, Colosimo; 1997).

Entre as definições encontradas de modos de falha, ainda, pode-se citar a de Cardoso apud O'Connor (2004): “Modo de falha é 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 a definição do próprio Cardoso “é o mecanismo pelo qual um item falha”.

Outra definição a ser mencionada: “Modos de falha são as categorias de falha que são normalmente descritas” (Pinto, Xavier; 2005).

O conhecimento dos modos de falha permite o direcionamento do banco de dados de manutenção, indicando para onde olhar e o que observar. Definindo-se os modos de falha mais significativos, juntamente com as características estatísticas das falhas pode-se não apenas padronizar um banco de dados, mas também orientar os envolvidos sobre o nível de detalhamento exigido em cada caso, desta forma fornecendo diretrizes para a tomada de decisões como a necessidade de substituições periódicas, revisões, monitoração ou mesmo se concluir a impossibilidade de medidas antes do surgimento da falha (Cornet, 2004).

Os modos de falha, além de serem a maneira pela qual um item pode falhar, podem ser denominados como determinada “falha” é popularmente conhecida.

Eventualmente poderão ser listados todos os possíveis modos de falha do equipamento, pois dependendo do tipo de sistema em análise, do ambiente que o mesmo irá operar, ou outras causas, apenas alguns modos de falha se aplicam ao caso em estudo, devendo esta hipótese ser claramente especificada na folha de análise. Ainda segundo Corrêa et al (2004) esta coluna deve conter registros de falha anteriores e a experiência adquirida em casos análogos ou semelhantes.

Na próxima coluna (quinta) listam-se, de forma simples e concisa, todas as causas ou razões possíveis que possam resultar ou originar o modo de falha considerado.

Causas são o meio pelo qual um elemento particular do projeto ou processo resulta em um modo de falha (Pinto, Xavier; 2005).

Na sequência da tabela (sexta coluna), são discutidas as ocorrências da falha, que são denominadas de efeito de falha, ou seja, elas descrevem o que acontece quando ocorre cada modo de falha. Os efeitos de falha devem descrever os efeitos locais (local), sobre outros subsistemas (próximo nível) e sobre o todo (final). A descrição dos efeitos deve conter todas as informações necessárias para suportar a avaliação da consequência da falha, tais como:

- 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)?

Por exemplo: Em um caminhão de transporte de congelados, o travamento do virabrequim do compressor da câmara frigorífica causa a falha do compressor no nível local, e subsequentemente causa uma falha do sistema (toda a câmara), no próximo nível.

Isto provoca um atraso na entrega do alimento congelado, devido à parada para manutenção, no nível final (Nutter et al, 2002).

Para completar ainda devem-se apresentar em outra coluna as possíveis formas de se detectar um dado tipo de modo de falha, ou indicação que o mesmo está para ocorrer, de forma a possibilitar a manutenção do problema e conseqüente minimização ou correção de seus efeitos sobre o sistema.

A penúltima coluna da tabela mostra a classificação da severidade de um modo de falha, a qual tem como efeito fornecer uma idéia qualitativa da gravidade do efeito do modo de falha do componente do sistema como um todo. Vários trabalhos apresentam opções de como classificar a severidade. Helman et al (1985), Freitas et al (1997), Palady (1997) apresentam tabelas baseadas na norma MIL-STD-1629A que Cardoso et al (2004) aplica como:

- I. Catastrófica: um modo de falha que cause a interrupção do funcionamento ou perda do sistema podendo causar inclusive mortes;
- II. Crítica: um modo de falha que cause um dano severo ao sistema, ou grave degradação na operação do mesmo, provocando redução em seu desempenho ou e a ocorrência de ferimentos graves;
- III. Marginal: Um modo de falha que cause ferimentos leves ou degradação moderada no desempenho do sistema.
- IV. Menor: um modo de falha que não cause ferimentos ou degradação no desempenho do sistema, mas resulte na sua falha, exigindo manutenção não programada.

Nas tabelas citadas são atribuídos valores para cada grau de severidade indo de 1 a 10, sendo 1 para uma falha menor severidade e 10 para uma falha catastrófica. Estes valores são divididos por faixas, podendo-se graduar a severidade dentro destas faixas, como por exemplo, uma falha marginal pode variar de 3 a 4.

A última coluna deve ser preenchida com as ações a serem tomadas no caso da identificação de um modo de falha, que esteja ocorrendo com o equipamento.

Se os modos de falha forem diagnosticados no início, pode-se implementar, na maioria das vezes, ações que, sem a obrigatoriedade de substituição de componentes, devem ser capazes de corrigir o problema. Desta forma, além da manutenção corretiva (com troca de componentes ou substituição do total do compressor), as ações de diagnóstico podem ser adotadas a fim de evitar gastos e paradas do equipamento.

O objetivo do FMEA é a construção de uma tabela de fácil consulta, onde se possa verificar qual falha está ocorrendo (ou ocorreu) e a melhor ação a ser tomada, a fim de se evitar ou pelo menos minimizar os danos ao equipamento. Os dados devem ser agrupados em tabelas como mostrado na Tab. 1.

Tabela 1: Exemplo de tabela de FMEA.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			

3.4.2 – Diagrama de Pareto

Um diagrama estatístico, que permite a hierarquização de falhas e modos de falha por ocorrência, verificando-se dados coletados em campo ou ensaios, muito útil é o Diagrama de Pareto, que aliada ao FMEA, torna-se uma ferramenta que permite de uma forma simples a definição de qual problema determinado equipamento é mais vulnerável, aliando esta informação aos efeitos causados.

Este diagrama tem diversas aplicações. Para exemplificar isto se tem o trabalho de Nutter et al (2002) onde foram coletados aproximadamente 170 dados de falhas de câmaras frigoríficas de caminhões de transporte de alimentos congelados de diferentes idades e condições. Neste estudo, o diagrama de Pareto foi usado para definir a ocorrência das falhas destas câmaras, concluindo que 56% das falhas foram provenientes do compressor.

Sua origem vem dos estudos do economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923).

Durante seus estudos, Pareto notou que cerca de 80% da riqueza de Milão estava concentrada com 20% da população (Evans, 1997).

A forma peculiar que ele apresentou seus dados recebeu mais tarde seu nome, mas também é conhecida como curva 80/20. Entretanto, deve-se ressaltar que esta proporção ocorre com frequência durante a análise de várias situações cotidianas como: estoques, atrasos de entregas, problemas de qualidade e falhas de equipamentos.

Esta constatação levou J. M. Juran a propor, na década de 1960, esta análise como forma de se separar os elementos vitais, os elementos que mais produzem problemas (Corrêa, Corrêa; 2004).

O objetivo do estudo é classificar os problemas que produzem os maiores efeitos e priorizar sua solução.

Para isto se constrói uma tabela onde na primeira coluna se indica os equipamentos, fornecedores ou falhas. Na segunda coluna indicam-se as quantidades de itens, ou seja, as ocorrências dos itens da primeira coluna. Em seguida, é feita a totalização dos itens em

estudo sendo que o próximo passo é o cálculo do percentual individual da ocorrência de cada item da primeira coluna. Esta etapa consiste na divisão das ocorrências individuais pelo total, sendo que o resultado é colocado na terceira coluna.

O próximo passo é a reordenação das linhas da tabela, de acordo com a ordem decrescente das participações percentuais individuais (terceira coluna). Depois são calculadas as participações acumuladas, e o resultado posicionado em uma quarta coluna.

Neste processo, a primeira linha do percentual acumulado é igual à primeira linha do percentual individual. Dessa forma, a partir da segunda linha, os valores do percentual acumulado são obtidos pela soma do percentual individual ao percentual acumulado anterior (vide Tab. 1).

Os valores obtidos das participações individuais e das participações acumuladas são traçados em um gráfico chamado gráfico de Pareto. As barras do gráfico são as participações individuais de cada item no sistema enquanto que a curva indica a participação acumulada.

4. – ESTUDO DE CASO

4.1 – Modos de falha de compressores alternativos

Como resultado do estudo realizado com a bibliografia disponível, acrescido do conhecimento adquirido com a análise de ocorrências de falhas em campo, os principais modos de falha dos compressores de sistemas de refrigeração foram definidos como:

Retorno de fluido refrigerante líquido: 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 (vide Fig. 17).



Figura 17: Pistões desgastados por Retorno de líquido (Silva, 2004).

- Causas:
 - Válvula de expansão imprópria (superdimensionada): uma válvula mal dimensionada permite uma maior passagem de refrigerante líquido do que o necessário, principalmente durante o funcionamento em carga parcial;
 - Perda de eficiência da evaporadora do lado do ar, por formação de gelo e incrustações: o fluxo reduzido de ar através de uma serpentina de expansão direta acarreta no congelamento da mesma. A camada de gelo isola a superfície de transferência de calor impedindo a correta evaporação do fluido refrigerante;
 - Má distribuição de ar na face da serpentina do evaporador (queima de ventilador do evaporador): a má distribuição de ar ao longo da serpentina pode ocasionar uma temperatura de sucção irregular, que acarreta em uma flutuação da válvula de expansão gerando retorno de fluido refrigerante no estado líquido.
 - Excesso de fluido refrigerante no sistema.
- Efeitos:
 - Devido ao efeito detergente do fluido refrigerante, este modo de falha é capaz de remover todo o filme de lubrificação das partes móveis do compressor, gerando desgaste progressivo e consequentemente sua quebra mecânica.
- Outros modos de falha que podem ser gerados:
 - Partida inundada;
 - Golpe de líquido.

Partida inundada: A migração de fluido refrigerante ocorre normalmente durante as paradas do compressor, resultado da condensação de fluido refrigerante na parte do sistema com temperaturas mais baixas.

O fluido refrigerante que circula como vapor é retido em forma de líquido, quando se condensa no local com temperaturas mais baixas (geralmente este local é o compressor). Isto irá continuar até que o sistema entre em equilíbrio em relação à temperatura e pressão do fluido refrigerante. Sendo o compressor construído com uma grande massa de ferro fundido, ele é normalmente o último a esfriar em uma parada e é geralmente o último componente do sistema frigorífico a se aquecer. À medida que a temperatura ambiente é

elevada, conseqüentemente o compressor é o componente com temperatura mais elevada do sistema após várias horas de parada do equipamento (vide Fig. 18).



Figura 18: Compressor com cárter congelado (Silva, 2004).

Este fluido condensado que se aloja no compressor tende a se misturar com o óleo lubrificante, que possui grande afinidade pelo mesmo, tendendo a diluí-lo. Isto faz com que o lubrificante perca grande parte de suas propriedades lubrificantes e causando muitos outros problemas.

- Causas:
 - Migração do fluido refrigerante, que se condensa, para o compressor quando o mesmo se encontra como a parte com temperaturas mais baixas do sistema.
 - Falha dos ventiladores do evaporador e condensador.
 - Falha do dispositivo de expansão.
 - Excesso de fluido refrigerante no sistema.
 - Retorno de fluido refrigerante líquido: o contínuo retorno de fluido refrigerante no estado líquido causa o resfriamento excessivo do bloco do compressor, acarretando a migração do fluido refrigerante que, por sua vez, promove a chamada partida inundada quando o sistema é ligado.

- Efeitos:
 - Diluição do óleo afetando sua capacidade de lubrificante principalmente durante a partida, causando contato de metal contra metal gerando desgaste e travamento das partes móveis.
 - Espumação, se o fluido refrigerante no estado líquido estiver contido dentro do compressor durante a partida, o óleo pode ser carregado em grande quantidade para fora do compressor na forma de espuma. Isto acarreta uma perda de lubrificação temporária até que óleo retorne ao compressor, depois de percorrer todo o sistema de refrigeração.
- Outros modos de falha que podem ser gerados:
 - Golpe de líquido;
 - Problemas de lubrificação.

Problemas de lubrificação: A perda de óleo consiste no não retorno do óleo ao cárter do compressor, impedindo assim a correta lubrificação ou o arrefecimento suficiente, o que resulta na geração de calor e desgaste (vide Fig. 19).



Figura 19: Virabrequim com sinais de desgaste por problemas de lubrificação (Silva, 2004).

Se um projeto inadequado permitir que grandes quantidades de óleo sejam retidas quando em carga mínima, o óleo poderá voltar como um golpe de líquido quando o compressor voltar a trabalhar com capacidade mais elevada. O excesso de óleo lubrificante tem o mesmo efeito.

- Causas:
 - Ciclagem curta (muitas partidas durante um curto espaço de tempo): dificulta a circulação do fluido refrigerante ao longo do sistema impedindo o retorno de óleo suficiente ao compressor, e pode gerar espumação.
 - Longos períodos de funcionamento com carga mínima: não permite a correta circulação de óleo, pois o óleo retorna diluído no fluido refrigerante.
 - Projeto inadequado de tubulação: a má disposição dos sifões de óleo na saída dos evaporadores ou no início de tubulações ascendentes da linha de sucção, falta de inclinação da linha de sucção em direção ao compressor ou inclinação no sentido oposto em tubulações horizontais, desenho ou seleção errônea do diâmetro da linha de sucção, não permitem o retorno do óleo junto com o fluido refrigerante ao longo do sistema.
 - Partida inundada, se o fluido refrigerante no estado líquido estiver contido dentro do compressor durante a partida, o óleo pode ser carregado em grande quantidade para fora do compressor na forma de espuma, resultando em um problema de lubrificação.
 - Superaquecimento excessivo, a falta de gás impede a correta circulação do óleo lubrificante pelo sistema.
 - Entupimento do filtro de óleo por impurezas.
- Efeitos:
 - Falta de óleo no cárter do compressor impede a correta lubrificação dos mancais dos componentes móveis, como virabrequim.
- Outros modos de falha que podem ser gerados:
 - Golpe de líquido (retorno do óleo retido ou excesso do mesmo);
 - Superaquecimento excessivo, gerado pelo aquecimento do compressor.

Golpe de líquido: Em compressores alternativos quando um grande volume de líquido (que pode ser fluido refrigerante, óleo lubrificante ou ambos) se encontra dentro do cilindro, o pistão não consegue expeli-lo pela válvula de descarga durante um pequeno período de tempo durante a compressão. Portanto, ele cria uma pressão excessiva no interior do cilindro. Esta pressão hidrostática cria excessivas cargas no pistão, que irá transmiti-la através da biela, virabrequim, etc. até o mancal principal, até que um dos componentes não agüente e falhe (vide Fig. 20).



Figura 20: Válvulas danificadas por golpe de líquido (Silva, 2004).

O contínuo retorno de fluido refrigerante no estado líquido causado pelo falta de superaquecimento também causa a refrigeração do bloco do compressor. Quando o sistema é desligado, o fluido refrigerante no estado líquido retido no bloco resfriado do compressor causa um golpe de líquido quando o compressor é ligado novamente. Como muitos sistemas de climatização operam com controle do tipo liga/desliga, o sistema pode ter inúmeros golpes de líquido durante um dia devido ao retorno do fluido refrigerante no estado líquido estar ocorrendo (vide Fig. 21).



Figura 21: Danos resultantes de um golpe de líquido (Silva, 2004).

- Causas:
 - Retorno de fluido refrigerante no estado líquido;
 - Partida inundada;
 - Problemas de lubrificação;
 - Excesso de óleo lubrificante no sistema;
 - Excesso de fluido refrigerante no sistema.
- Efeitos:
 - Quebra mecânica causada pela tentativa do compressor de comprimir líquido.

Superaquecimento excessivo: É gerado diante de uma elevada temperatura na descarga do compressor. Ocorre principalmente quando se trabalha com um valor elevado do superaquecimento do vapor de fluido refrigerante na sucção deste equipamento. As temperaturas de descarga elevadas afetam a viscosidade do óleo e inclusive podem carbonizá-lo. A diminuição na viscosidade do óleo ocasionará uma diminuição da resistência da película lubrificante, a qual pode chegar a romper-se e permitir o contato de metal contra metal, com o conseqüente desgaste (vide Figs. 22 e 23).



Figura 22: Válvulas carbonizadas (Silva, 2004).



Figura 23: Pistão com óleo carbonizado (Silva, 2004).

- Causas:
 - Alta razão de compressão *;
 - Baixa carga de fluido refrigerante *;
 - Controle de capacidade do motor abaixo do seu limite de projeto *;
 - Restrição da linha de fluido refrigerante *;
 - Contaminação por umidade, obstrução da linha *;
 - Falha dos ventiladores do condensador, isto ocorre devido ao fato de não ocorrer transferência suficiente do fluido refrigerante para o ar;
 - Falhas do condensador, incrustações podem impedir a correta transferência de calor, em equipamentos de refrigeração que trocam calor com um segundo fluido (trocadores de calor casco tubo que podem utilizar água) a troca insuficiente com este segundo fluido pode gerar o superaquecimento excessivo;
 - Falha do dispositivo de expansão, uma válvula de expansão subdimensionada pode impor uma elevada restrição ao fluxo desta forma alterando a troca de calor no evaporador;

* Segundo Silva (2004) “Cada uma destas causas leva ao mesmo resultado” baixo fluxo de massa de refrigerante, como o calor gerado pelo motor e o atrito entre as partes girantes estão sempre presentes. Qualquer condição que reduza a vazão de fluido refrigerante abaixo do especificado pelo projeto do compressor tende a aquecer o fluido refrigerante e o compressor.

- Problemas de lubrificação geram calor que aquecem o fluido refrigerante e o compressor.
- Efeitos;
 - Perda da viscosidade do óleo que acarreta na falta de lubrificação das partes móveis do compressor, gerando desgaste intenso, aderência de componentes e carbonização do óleo.
 - Quebra de válvulas por mudanças de propriedades devido ao calor.
 - Desgaste do pistão por expansão térmica.
 - Superaquecimento do compressor.
 - Queima do motor elétrico.
- Outros modos de falha que podem ser gerados:
 - Superaquecimento excessivo.

Contaminação por umidade: Práticas inadequadas quando realizadas durante a instalação e manutenção (falta de cuidado, defeito de acabamento, falta de equipamentos e insumos), permitem a entrada de ar úmido na linha de fluido refrigerante. Esta umidade ataca a linha, componentes (corrosão), o fluido refrigerante e ainda pode acarretar a formação de gelo que pode causar restrições de vazão do fluido refrigerante (vide Fig. 24).



Figura 24: Umidade presente no bloco do compressor (Silva, 2004).

- Causas:
 - Ar introduzido no sistema durante a instalação ou manutenção da tubulação;
 - Manuseio incorreto dos óleos lubrificantes do compressor durante a manutenção, permitindo contato com umidade.
- Efeitos:
 - Oxidação, corrosão, decomposição do fluido refrigerante;
 - Calor excessivo devido à fricção;
 - Desgaste das superfícies de contato.
- Outros modos de falha que podem ser gerados:
 - Superaquecimento excessivo, devido a restrições na linha do fluido refrigerante.

Contaminação por impurezas do ar: Materiais estranhos, tais como sujeira, fluxo de solda, ou produtos químicos juntamente com o ar, resultam em desequilíbrios químicos que provocam ruptura das moléculas de óleo. Esta condição aliada ao calor oriundo das altas temperaturas de descarga do sistema e das temperaturas devido ao aumento da fricção, pode resultar na formação de ácidos, incrustação ou ambos (vide Fig. 25).



Figura 25: Filtros de sucção entupidos (Silva, 2004).

- Causas:
 - Ar com impurezas introduzido no sistema durante a instalação ou manutenção da instalação da tubulação aliada a altas temperaturas;
 - Manuseio incorreto dos óleos lubrificantes do compressor durante a manutenção aliada a altas temperaturas.
- Efeitos:
 - Formação de ácidos e incrustação (lodo) que aumentam a fricção e geram desgaste.
- Outros modos de falha que podem ser gerados:
 - “Copper plating”.

Contaminação por óxidos: A formação de óxidos ocorre quando o calor aplicado pelo maçarico é realizado na presença de ar. Estes óxidos se acumulam no filtro de óleo acarretando em uma perda de óleo.

- Causas:
 - Ocorre quando o calor aplicado pelo maçarico é realizado na presença do ar.
- Efeitos:
 - Entupimento do filtro de óleo causando perda de lubrificação.



Figura 26: Filtro de óleo entupido por óxidos (Silva, 2004).

Cooperplating: O cobreamento surge em duas fases. Primeiramente, o cobre é dissolvido nos subprodutos de uma reação entre óleo e o fluido refrigerante. A quantidade de cobre dissolvido é determinada pela natureza do óleo, pela temperatura e pela presença de impurezas. Na segunda fase, o cobre dissolvido é depositado nas partes metálicas numa reação eletroquímica (vide Fig. 27).

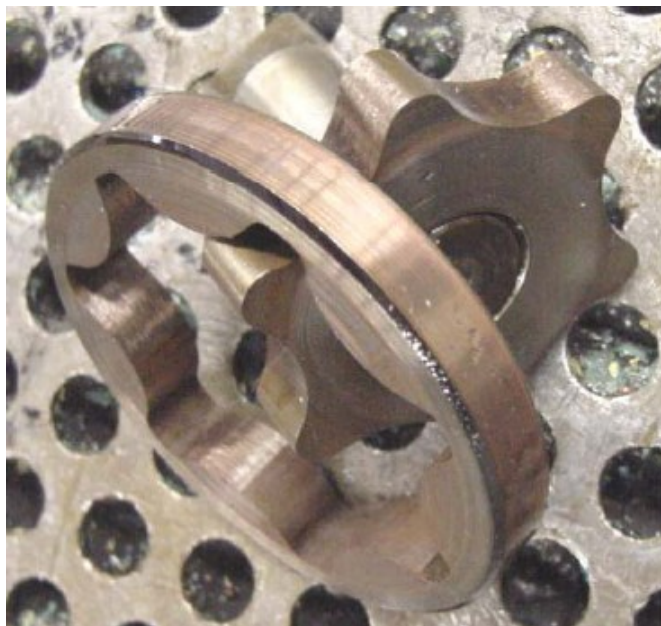


Figura 27: Bomba de óleo “cobreada” (Silva, 2004).

- Causas:
 - Temperatura de descarga do fluido refrigerante muito elevada e presença de impurezas.
- Efeitos:
 - Cobreamento de superfícies das peças de tolerância rígidas que funcionam a altas temperaturas resultando em desgaste e emperramento e na conseqüente quebra mecânica de componentes.

Sobrecarga do motor elétrico: Há maior probabilidade de ocorrer uma sobrecarga resultando na queima completa do motor elétrico quando o motor está na posição parada. No momento que o motor é energizado, as solicitações elétricas e mecânicas sobre os enrolamentos são as mais fortes. Se nesta ocasião, a tensão for baixa ou o compressor

estiver mecanicamente travado, o motor se queimará se os componentes de proteção não forem acionados a tempo (vide Fig. 28).



Figura 28: Motor queimado (Silva, 2004).

- Causas:
 - Temperatura de descarga de refrigerante muito elevada;
 - Falta de fase elétrica: a falta de corrente numa das fases de um motor elétrico trifásico faz com que ele atue como se fosse monofásico. Isso faz com que as duas fases resultantes trabalhem com corrente excessiva. Se os reles de sobrecarga não desligarem o motor rapidamente, estas duas fases se queimarão;
 - Sub e sobre tensão;
 - Travamento por falha mecânica;
 - Ciclagem curta, que causa o superaquecimento do motor elétrico;
- Efeitos:
 - Queima do motor elétrico do compressor que acarreta parada total do compressor.

Rompimento do enrolamento do motor elétrico: Fragmentos de metal resultantes de falhas mecânicas podem ficar alojados nos enrolamentos do motor. Estes fragmentos podem funcionar como ferramentas de corte, causando danos aos isolamentos do mesmo. Este modo de falha pode surgir meses após a ocorrência da falha mecânica que originou o fragmento. Outra forma de danificar de forma pontual o enrolamento do motor é com a

sobre correção do fator de potência (correção feita com o uso de capacitores no quadro elétrico) que irá ocasionar um pico de tensão (vide Fig. 29).



Figura 29: Queima de um único ponto do enrolamento do motor (Silva, 2004).

- Causas:
 - Ponto queimado (curto circuito) causado por um fragmento de palheta do conjunto de placa de válvulas aspirado pela sucção do compressor;
 - Ruptura do isolamento resultado de um esforço normal (variações de temperatura causam expansão do cobre maior que a do isolamento).
 - Pico de tensão resultante da sobrecorreção do fator de potência (estes equipamentos trabalham sobra de potência no motor elétrico, quando a correção feita com o uso de capacitores ultrapassa, o estabelecido pelo fabricante do compressor, causa o aquecimento localizado do enrolamento do motor gerando a queima).
- Efeitos:
 - Queima do motor elétrico que acarreta parada total do compressor.

4.2 - Ocorrência dos modos de falha

Nesta parte do trabalho será apresentada a ocorrência dos principais modos de falha de compressores alternativos.

A fonte das informações para a elaboração desta parte do trabalho foram os laudos técnicos e de controle de uma grande empresa do setor de refrigeração comercial. Estes laudos totalizam mais de 600 modos de falha que foram registrados no período de 2 anos.

Deve-se ressaltar que os modos de falha que serão utilizados podem ser considerados apenas prováveis. Isto porque a empresa é a única a realizar a manutenção dos compressores e na maioria das vezes não se possui dados referentes ao sistema que, como foi notado anteriormente, tem grande influência sobre as condições de operação do compressor.

O critério de separação dos modos de falha adotado é o que foi definido no item anterior, ou seja:

- Retorno de fluído refrigerante líquido;
- Partida inundada;
- Problemas de lubrificação;
- Golpe de líquido;
- Superaquecimento excessivo;
- Contaminação por umidade;
- Contaminação por impurezas do ar;
- Contaminação por óxidos;
- “Cooperplating”;
- Sobrecarga do motor elétrico;
- Rompimento do enrolamento do motor elétrico;

A análise dos relatórios se mostrou um tanto quanto subjetiva. Isto ocorre, pois, durante esta análise, foi notado que em diversos relatórios apresentavam-se indícios da ocorrência de mais de um modo de falha. Em outros relatórios, verificou-se que, para um modo de falha, mais de um efeito nos componentes foi constatado.

No primeiro caso foi atribuído ao modo de falha que se considerou o “culpado imediato”, ou seja, o modo de falha que estava em estado mais avançado e apresentando maiores danos. Como exemplo, pode-se citar que a ocorrência de um modo de falha com características de um provável superaquecimento excessivo. No entanto, estavam claros os danos causados por um golpe de líquido devido a excesso de óleo que pode ser atribuído a problemas de lubrificação (excesso de óleo). Neste caso, considerou-se como modo de falha o problema de lubrificação que foi a origem do golpe de líquido por ser mais severo

que o superaquecimento excessivo caracterizado pelo desgaste e indícios de temperatura alta.

No caso dos componentes danificados que apresentaram indícios que podem ser atribuídos a mais de um modo de falha, se levaram em consideração traços que “geralmente” caracterizam apenas um dos casos, por exemplo: um golpe de líquido, que gera elevados danos, pode ser atribuído ao retorno de líquido ou problemas de lubrificação.

Porém em muitos casos, no primeiro momento geralmente os pistões e anéis se encontram desgastados (“arranhados”) junto com o cilindro ao qual pertencem, devido à lavagem das paredes do mesmo pelo refrigerante líquido, que acarreta em falta de lubrificação. Então na falta de outros indícios o modo de falha considerado foi o retorno de refrigerante líquido.

Durante o processo de separação das diversas ocorrências de falhas, notou-se que as categorias de falhas adotadas não eram as mais adequadas. Isto porque alguns modos de falha não apresentaram ocorrência no período, em outros essa ocorrência foi muito pequena. Ainda em outros casos, dada as suas características, as falhas se originaram de outros modos de falha ou mesmo apresentaram danos aos componentes com características semelhantes, que dificultam sua distinção, apesar dos modos de falha serem claramente distintos.

Acrescente-se a isto a existência de casos que não se encaixavam em nenhuma das categorias apresentadas, ou não foi possível definir a qual ele pertence, sendo necessário a inclusão de uma nova categoria. Em função destas constatações, uma nova categorização dos modos de falha foi realizada, a saber:

- Retorno de fluido refrigerante líquido, que engloba partida inundada;
- Problemas de lubrificação;
- Superaquecimento excessivo;
- Contaminação, que reúne: contaminação por umidade, por impurezas do ar, por óxidos e cooperplating;
- Problema elétricos, que é a junção da sobrecarga do motor elétrico e rompimento do enrolamento do motor elétrico;
- Defeitos de fabricação;
- Outros casos.

A análise das ocorrências dos modos de falha dos compressores alternativos será analisada com o auxílio do diagrama de Pareto, apresentado a seguir.

Tabela 2 – Diagrama de Pareto para os modos de falha do compressor alternativo.

Tipo de modo de falha	Ocorrência (unid.)	Participação individual (%)	Participação acumulada (%)
Retorno de fluido refrigerante líquido	161	26,39	26,39
Problemas de elétricos	125	20,49	46,89
Superaquecimento excessivo	111	18,20	65,08
Problemas de lubrificação	78	12,79	77,87
Defeitos de fabricação	73	11,97	89,84
Outros casos	38	6,23	96,07
Contaminação	24	3,93	100,00
Total	610		

Observando a distribuição dos valores da Tab. 2, verifica-se que o comportamento dos modos de falha não seguem a distribuição normal do diagrama de Pareto (a curva não apresenta o formato característico de grande concentração de ocorrências por uma pequena minoria de causas, como 80% das ocorrências em apenas 20% das causas), isto é devido ao provável “vício” dos dados analisados, que podem ser tendenciosos, dada as características da coleta dos dados.

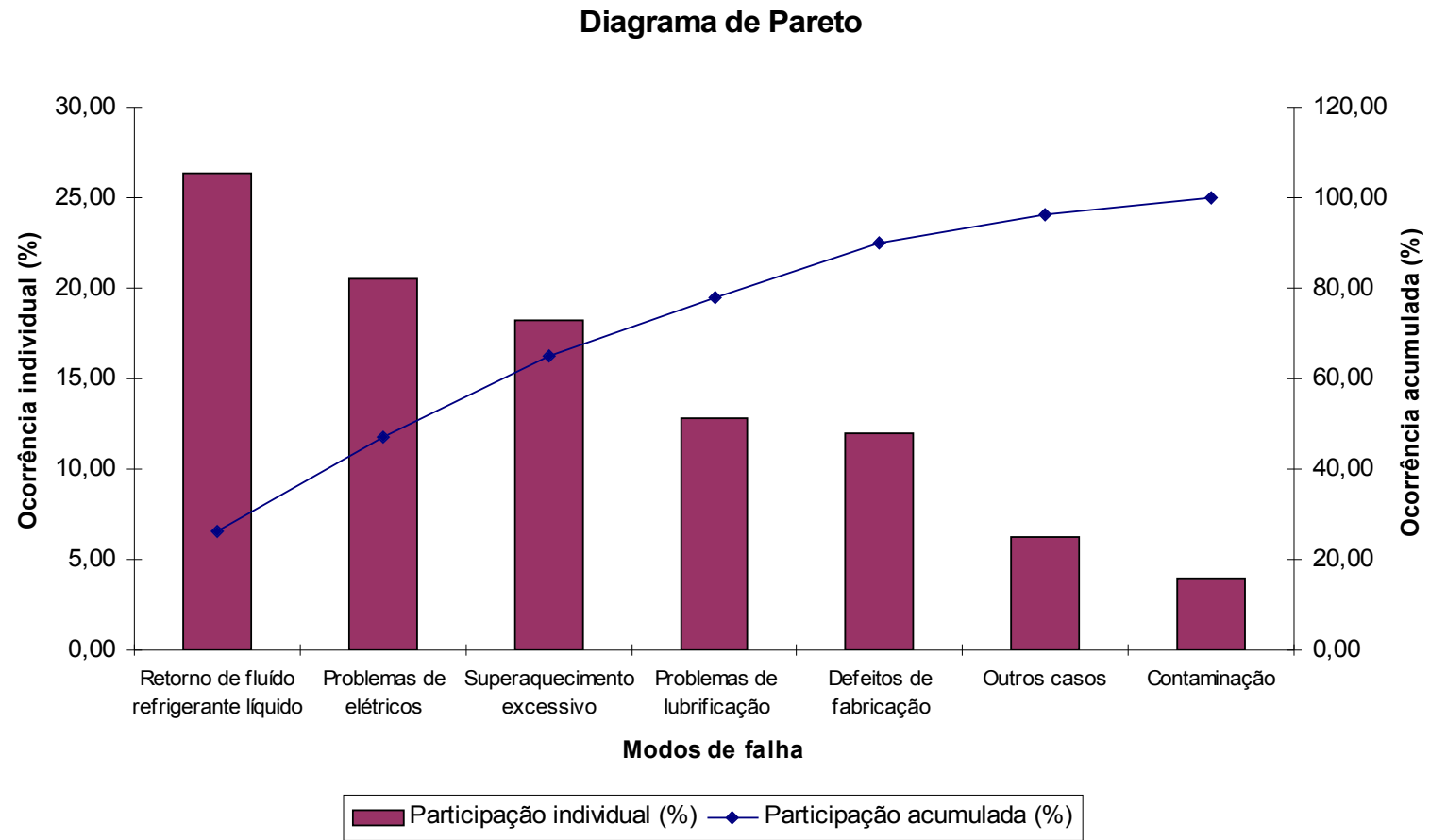


Figura 30 – Diagrama de Pareto para os modos de falha do compressor alternativo.

4.3 - Aplicação do FMEA para compressores alternativos

A aplicação do FMEA em compressores alternativos semi-herméticos tem por finalidade servir como 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, efeitos e junto com esta informação as 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 já citada. 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.

Além disso, 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 tabela abaixo.

Tabela 3 - 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.

No anexo deste trabalho se localizam as tabelas do FMEA realizado para compressores alternativos.

A Fig. 31 representa o esquema de uma câmara frigorífica real onde é possível se verificar a montagem dos sistemas de proteção como “pump dow” e acumulador de sucção.

A extrapolação do uso deste FMEA (anexo 1) para os demais compressores alternativos pode ser realizada conforme algumas observações anotadas na apêndice 2.

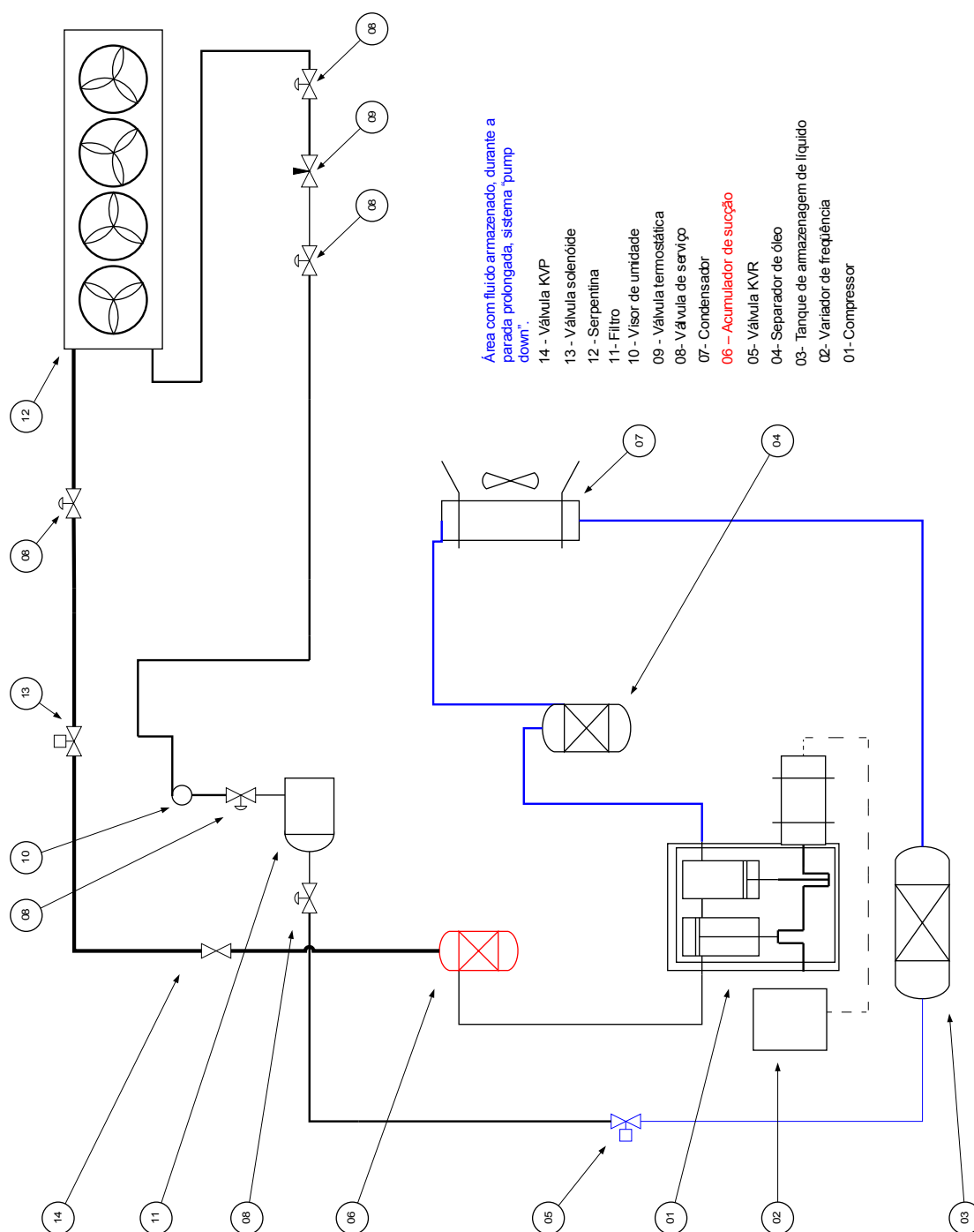


Figura 31 – Esquema da distribuição dos componentes de uma câmara frigorífica real.

4.4 - Estimativa de confiabilidade de compressores semi-herméticos alternativos de sistemas de refrigeração

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.

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente para estudos relacionados ao tempo de falha de produtos sujeitos a fadiga. Uma vantagem da aplicação da distribuição de Weibull em aplicações práticas deve-se ao fato de ela apresentar uma grande variedade de formas podendo compreender as outras distribuições citadas (Pinto, Xavier; 2005).

A variação do parâmetro de forma β pode indicar algumas características da distribuição de Weibull em estudo (O'Connor, 2002):

- $\beta < 1$, indica que a taxa de falha diminui com o tempo. Comportamento de equipamentos com elevada “morte infantil” como alguns programas eletrônicos (Lewis, 1996).
- $\beta = 1$, indica que a distribuição é semelhante à distribuição exponencial. Ou seja, a distribuição é caracterizada por falhas aleatórias, no entanto pode indicar que os dados são suspeitos, ou que a amostra esta comprometida. Componentes eletrônicos podem assumir esta distribuição.
- $\beta > 1$, sugere taxa de falha crescente ao longo da vida do equipamento. Comportamento característico de equipamentos sujeitos a desgaste.
- $\beta = 2,5$ a distribuição se assemelha a distribuição lognormal. Ela descreve o tempo de vida de produtos e materiais, 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 alguns autores como Carter (1986) este comportamento é característico de componentes mecânicos sujeitos a desgaste ("wear out").

- $\beta=3,44$ é semelhante à distribuição normal. Utilizada para materiais naturais, fenômenos biológicos (Carter, 1986), equipamentos que sofrem desgaste crescente no tempo (Lewis, 1996).

Este desgaste referido também chamado de “wear out” é um termo mais amplo que somente desgaste, segundo Carter (1986) o wear out engloba:

- Erosão (ação mecânica);
- Corrosão;
- Fadiga;
- Degradação superficial;
- Envelhecimento;
- Fluência;
- Contaminação;
- Vazamentos
- Variação térmica;
- Desmontagem;
- Acúmulo de sujeira.

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 capítulo 3.2.2 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.

Possui também diversas ferramentas de análise permitindo diversos tipos de cálculos e relatórios gráficos, como estimadores de parâmetros e cálculos, geração de

gráficos e relatórios automatizados. Ele executa diversas outras análises como as de garantia.

Como 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 da seguinte forma:

Tabela 4 – Dados de entrada do programa de confiabilidade.

Modelo	mês de fabricação	unidades fabricadas neste mês	% de falha	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.

Pelo método da regressão linear, através do comportamento estatístico da amostra, consegue-se obter o comportamento da distribuição. Por esse método foi obtido o coeficiente de correlação das curvas das distribuições lognormal e de Weibull, verificando-se qual é a mais adequada.

Sendo o método dos momentos normalmente menos preciso que o método da máxima verossimilhança, optou-se pelo segundo método para análise (vide capítulo 3.3.1 Método para estimativa de parâmetros de distribuições de confiabilidade).

Além dos gráficos de confiabilidade e taxa de falha em função do tempo, o programa fornece os valores do tempo de vida médio do equipamento (“mean time to failure”) e dados de confiabilidade para uma determinada parcela da amostra (95%, 85%).

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, logo 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, conforme apresentado na Tab. 5.

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.

4.4.1 - Considerações iniciais

Foram analisados compressores com um ano de vida dos quais foram separados os que apresentavam uma boa relação de unidades produzidas por quantidade de falhas.

Os compressores selecionados podem ser verificados na tabela a seguir:

Tabela 5 – Compressores alternativos selecionados para o teste de confiabilidade

Modelo	OBS/ Tipo	Aplicação	Potência (W)	Vasão (m³/h)	Número de cilindros	Curso do pistão (mm)	Diâmetro do pistão (mm)
A	COMPACTO	CONGELADOS	4557,0	39,2	4	55	39,3
B	COMPACTO	CONGELADOS	3822,0	32,4	4	50	39,3
C	COMPACTO	ALTAS E MÉDIAS	5292,0	32,4	4	50	39,3
D	NORMAL	ALTAS E MÉDIAS	22197,0	102,0	4	75	55
E	NORMAL	CONGELADOS	7497,0	58,5	4	65	42
F	NORMAL	ALTAS E MÉDIAS	11172,0	58,5	4	65	42
G	NORMAL	ALTAS E MÉDIAS	29547,0	153,0	6	75	55

Os compressores selecionados apresentam algumas características distintas entre si, estas diferenças serão citadas conforme surgem suas colunas na tabela.

A primeira esta na coluna chamada de OBS/ Tipo onde os compressores podem se observados em dois grupos, compactos e normais. Os compressores se diferenciam pelo fato dos compressores chamados de “compactos” apresentarem uma relação volume ocupado deslocamento mais conveniente (menor) e menor peso. Mas estas não são as únicas mudanças entre os dois tipos de maquinas os compressores compactos apresentam otimizações no sistema de lubrificação eliminando alguns componentes.

Na coluna de aplicação pode-se verificar novamente a ocorrência de dois tipos de aplicações, com um agrupamento distinto em relação ao encontrado na coluna das OBS/ Tipo. A aplicação chamada de congelados são os compressores usados em câmaras frigoríficas enquanto que a aplicação chamada de altas e médias temperaturas são os compressores de sistemas de ar condicionado (altas temperaturas), e câmaras de resfriados (médias temperaturas). Câmaras de resfriados são normalmente encontradas na forma de gôndolas de supermercado.

Essa diferença na aplicação destes equipamentos implica em mudanças na instalação e projeto. Equipamentos usados para congelados têm um funcionamento mais uniforme e funcionam mais horas por dia que os equipamentos de altas e médias temperaturas. Estes últimos, no entanto apresentam um funcionamento mais intermitente obrigando o compressor a executar um maior número de partidas por horas (que podem gerar falhas). Por esses motivos, estes compressores apresentam motores elétricos de maior potência para compensar esse aspecto de operação. Outro fator que altera as características construtivas destes compressores é o fato deles trabalharem com um fluido refrigerante mais denso, que permite o redirecionamento do fluxo de fluido refrigerante da sucção para o motor (para assim melhor refrigerá-lo) e seqüencialmente para o cárter e câmara de compressão.

Os compressores de congelados trabalham com fluido refrigerante mais rarefeito que tornam esse mecanismo ineficaz, obrigando em muitos casos os usos de ventilação extra (ventiladores de cabeçote), e o fluido refrigerante segue direto para o cárter.

Esses fatos podem ser observados nos compressores B e C que apresentam as mesmas características construtivas do compressor, mesma vazão, mas potências diferentes.

4.4.2 – Avaliação inicial das falhas

Na primeira alternativa testada no trabalho foi seguida a seqüência vista no início do desenvolvimento deste capítulo.

Foi realizada a seleção da curva que melhor se adequa entre as distribuições Lognormal e de Weibull, pelo método da regressão linear. A seleção foi feita tomando-se por base o coeficiente de correlação (R^2), onde se obteve os seguintes resultados:

Tabela 6 – Coeficientes de correlação.

Modelo	Distribuição			
	Weibull		Lognormal	
A	β	2,6951	μ	3,6947
	η	27,8928	σ	0,8988
	R^2	0,9592	R^2	0,9716
B	β	1,8477	μ	4,6571
	η	27,8928	σ	1,3363
	R^2	0,9716	R^2	0,9771
C	β	1,801	μ	5,1826
	η	747932	σ	1,4839
	R^2	0,9595	R^2	0,9951
D	β	2,147	μ	3,9579
	η	34,518	σ	1,105
	R^2	0,9853	R^2	0,989
E	β	1,4399	μ	6,3588
	η	181,7295	σ	1,8827
	R^2	0,9647	R^2	0,9531
F	β	1,2373	μ	6,6534
	η	224,0222	σ	2,1456
	R^2	0,9772	R^2	0,9724
G	β	2,3948	μ	3,6521
	η	28,4131	σ	0,9583
	R^2	0,997	R^2	0,9979

Pode-se verificar que os coeficientes R^2 encontrados para os modelos de compressor mostram uma variação pequena entre as distribuições de Weibull e Lognormal. A maioria dos modelos é melhor representada pela distribuição lognormal e somente os compressores modelos E e F têm uma melhor representação pela distribuição de Weibull.

Com o uso do método da máxima verossimilhança foram então obtidas as curvas de confiabilidade e da taxa de falha extrapolada para uma vida estimada de 240 meses ou 20 anos (vide Tab. 7).

Tabela 7 – Valores dos parâmetros encontrados para as distribuições Lognormal e de Weibull.

Model o	Lognormal		Weibull	
	μ	σ	β	η
A	3,73	0,89	2,4 7	33,04
B	5,95	1,89	1,1 6	223,70
C	5,65	1,67	1,4 3	145,31
D	4,00	1,09	1,9 5	42,96
E	5,93	1,66	1,5 9	146,54
F	7,11	2,27	1,0 8	435,14
G	3,75	0,98	1,9 9	38,22

A Tab. 7 mostra os valores encontrados com o método da Máxima Verossimilhança para os seguintes parâmetros das distribuições de confiabilidade:

- Lognormal: média e desvio padrão
- Weibull: parâmetro de comprimento e posição

Para ambas foi adotada como hipótese o período de um ano de operação dos compressores alternativos em estudo.

A partir destes valores foram definidas as curvas com os dados de confiabilidade e taxa de falha para o período de 240 meses de vida de cada equipamento.

O programa Weibull ++ permite gerar as curvas das distribuições de confiabilidade utilizadas. Sendo assim, este programa foi usado para se obter principalmente os parâmetros específicos de cada distribuição (β , η , μ e σ). Porém, para uma maior facilidade de visualização e comparação dos dados, as curvas das distribuições foram elaboradas em planilha eletrônica. No caso da distribuição de Weibull, elas foram obtidas de forma direta, ou seja, os parâmetros foram introduzidos

em uma planilha para se criar as curvas da distribuição, sendo necessários poucos ajustes e as correções de escala.

Já no caso da distribuição lognormal, a planilha eletrônica utilizada (Microsoft Excel) não dispunha dos mesmos recursos e foi necessária a inserção das expressões apresentadas no início deste trabalho (capítulo 3.2.2.3 - Distribuição Lognormal), e em alguns casos uma aproximação foi necessária.

Para verificação das curvas encontradas as mesmas foram comparadas com as fornecidas de forma independente pelo programa de confiabilidade utilizado. As curvas encontradas são apresentadas na Figs. 32 e 33.

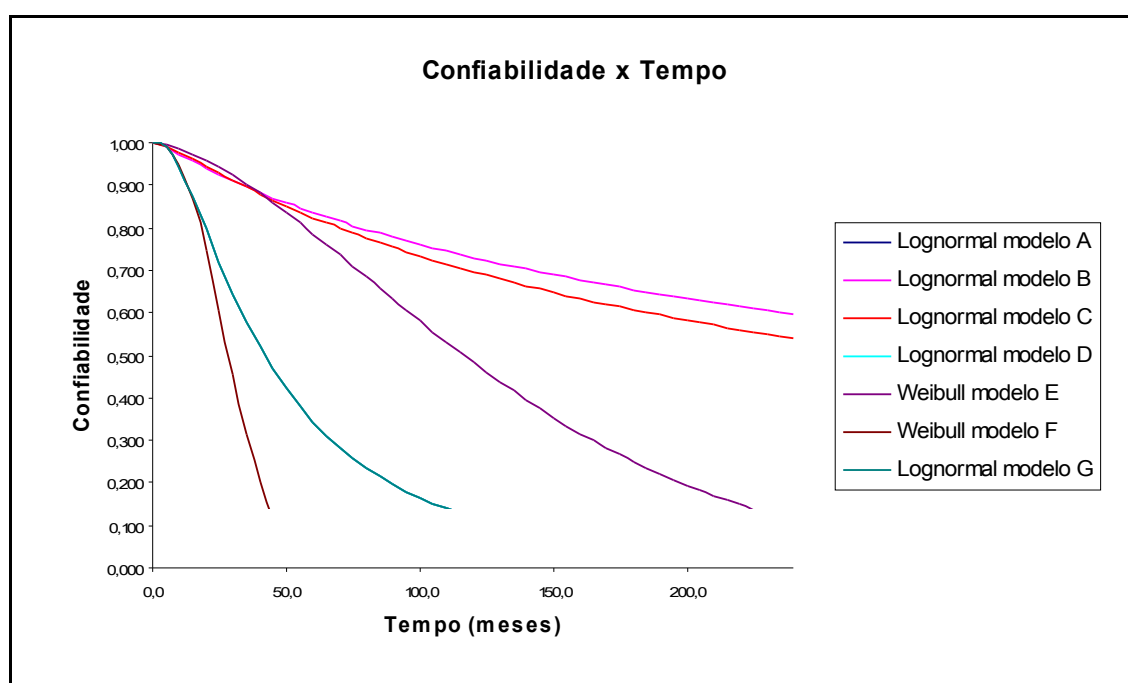


Figura 32 – Curvas de confiabilidade encontradas para as distribuições Lognormal e de Weibull.

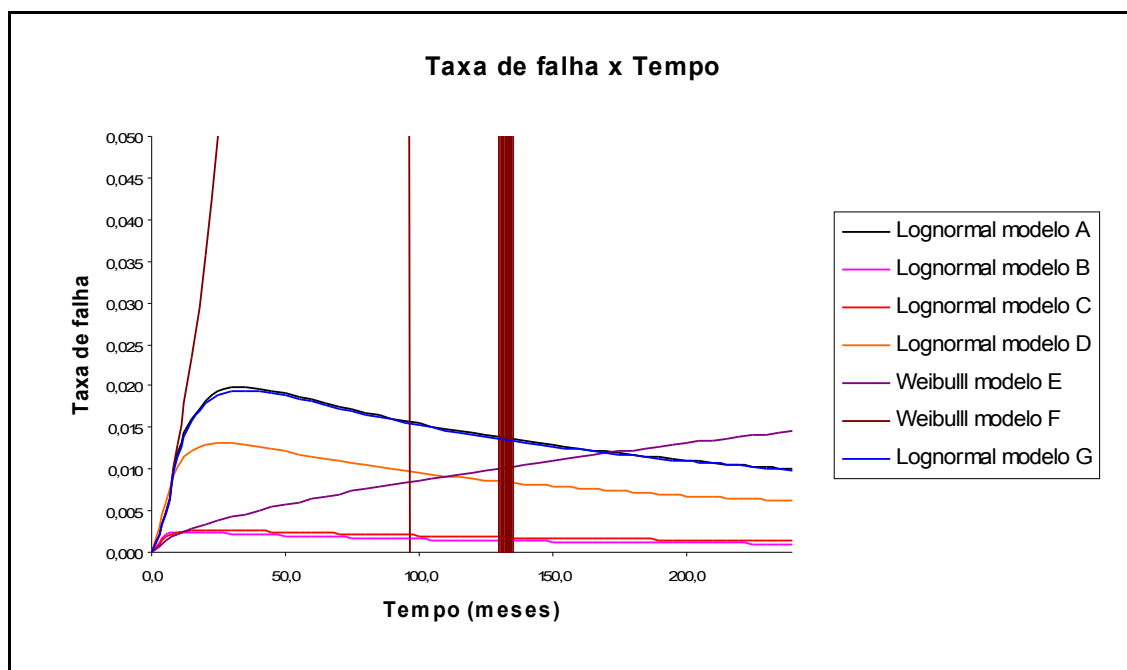


Figura 33 – Curvas da taxa de falha encontradas para as distribuições Lognormal e de Weibull.

Com base no FMEA de compressores alternativos, foram feitas observações quanto ao comportamento dos modos de falha dos compressores alternativos semi-herméticos abordando o uso dos mesmos pelo mesmo período de funcionamento (tempo de operação) em câmaras frigoríficas.

Estas observações são referentes à ação dos modos de falha, ou seja, a sua severidade ou a velocidade com que o mesmo se desenvolve ao longo do ano estudado.

Os modos de falha foram divididos em de ação lenta, quando sua ocorrência foi preferencialmente verificada no final do ano, média quando a mesma eram mais concentradas no meio e rápida quando era verificada usualmente no início do período.

No entanto foi necessário o uso de mais uma definição para os modos de falha sem distribuição preferencial ao longo do ano, ou seja, os modos de falha aleatórios (que compreendem a região dos modos de taxa de falha constante ao longo do tempo).

Alguns dos modos de falhas característicos destes equipamentos se mostraram alterados em relação ao seu comportamento, verificado durante o estudo realizado para análise de ocorrência.

Tabela 8 – Ocorrência dos modos de falha considerados para um funcionamento de 20 horas e 20 dias por mês.

Modos de falha	Idade média (horas de operação)
Retorno de fluido refrigerante no estado líquido	3120,0
Migração de fluido refrigerante	3333,3
Problemas de lubrificação	1900,0
Golpe de líquido	2396,7
Superaquecimento excessivo	2533,3
Contaminação	3400,0
Problemas elétricos	2866,7
Defeitos de fabricação	3050,0

A maioria dos modos de falha apresentou o comportamento esperado, para o período adotado de um ano, como os associados a modos de falha de origem elétrica que se comportaram de forma aleatória.

O comportamento associado à sobrecarga, também denominado golpe de líquido, tem uma ação rápida pois a sua intensidade é muito maior. A maioria dos modos de falha associados ao desgaste como retorno de fluido refrigerante líquido, partida inundada (migração de fluido refrigerante) e contaminação dos diferentes tipos apresentam uma velocidade de ação mais baixa, comparando-se com os demais modos de falha.

No entanto, observou-se um comportamento atípico para alguns modos de falha caracterizados como de ação lenta, como o superaquecimento excessivo, que está associado ao vazamento de fluido refrigerante. Este vazamento pode ter origem em erros de manutenção ou operação. Verificou-se que este modo de falha apresentou um comportamento de ação mais rápida e destrutiva, provavelmente devido a erros de instalação ou projeto, afetando principalmente a ventilação e refrigeração do compressor.

Os problemas de lubrificação usualmente se apresentam como um modo de falha de ação rápida, podendo ser facilmente associados a erros de projeto, como inclinação de tubulações e colocações de sifões. Porém se estes problemas estiverem associados ao aquecimento do fluido refrigerante, este modo de falha passa a agir de forma mais lenta.

Um modo de falha, que não faz parte do escopo inicial e que foi considerado, é o defeito de fabricação. Este modo de falha, que pode vir a provocar falhas catastróficas, pode ter sua origem associada, nestes compressores, a defeitos do material ou excesso de folgas que acabam gerando desgaste.

As curvas e informações observadas no ensaio nos mostram que os compressores podem ser divididos em três grupos distintos. Esta divisão foi feita com base na análise

do comportamento das curvas de taxa de falha e confiabilidade (Fig. 32 e 33). Um primeiro grupo seria dos compressores dos tipos A, D e G, o segundo dos tipos B e C e um terceiro com os compressores E e F, sendo que estes últimos apresentam um comportamento quase distinto entre si.

Vale ressaltar o fato dos compressores dos tipos A, B, C, D e G apresentarem uma distribuição lognormal, que é típica de equipamentos mecânicos sujeitos a desgaste (wear out). Os demais tipos apresentam um comportamento que não se distancia muito desta distribuição, o que pode ser verificado pelo coeficiente de correlação avaliado.

O primeiro grupo dos compressores dos tipos A, D e G é composto por componentes com comportamento descrito como tipicamente mecânicos sujeitos a altas cargas em altos ciclos. Eles apresentam uma distribuição das falhas constante aumentando no fim do período estudado. Seus principais modos de falha estão ligados a modos de falhas mecânicos, apesar dos tipos D e G apresentarem modos de falha elétricos. Isso pode ser interpretado no sentido de que a origem destas falhas elétricas (sobrecarga do motor elétrico) tem origem mecânica (superaquecimento excessivo com baixa intensidade), já que as mesmas apresentam uma ação mais lenta.

Todos os modelos analisados apresentam golpe de líquido como modo de falha.

Deve-se ressaltar que este modo de falha pode ser considerado como principal no que se refere a análise feita para os tipos D e G. No entanto, com a consideração feita acima pode-se admitir que os modos de falha dominantes têm menor velocidade de ação.

Este comportamento resulta em uma vida média pequena, até um quarto da esperada, na ausência de manutenção.

O segundo grupo dos tipos B e C, onde se destacam como principais modos de falha o superaquecimento excessivo intenso (B), perda de lubrificação (C) e golpe de líquido, sendo este significativo em ambos. Estes modos de falha se caracterizam por serem de ação rápida e se concentrarem no começo da vida do componente. Quando esta forma de distribuição é extrapolada (Figs. 25 e 27) indica uma taxa de falha com rápido decréscimo levando a uma vida média estimada muito longa, porém improvável. Este comportamento aponta para desgaste de baixa carga e médios (B) e baixos (C) ciclos.

O terceiro grupo composto pelos compressores E e F tem como característica principal o fato de ambos os modelos apresentarem parcelas significantes de contaminação como modo de falha. Pela sua ação mais lenta; já que pelo período considerado compressores que não sofreram manutenção têm como fonte inicial e única de contaminação a própria instalação; a distribuição que melhor os representa é a de

Weibull. Os compressores do tipo E se assemelham ao comportamento de equipamentos mecânicos sujeitos a altas cargas em altos ciclos (distribuição lognormal), provavelmente porque seu modo de falha dominante é contaminação. Já os compressores do tipo F possuem um coeficiente de forma da distribuição de Weibull próximo a um, que indica não possuírem um modo de falha dominante. Verificando-se os modos de falha é fácil notar que o único modo de falha que apresenta uma maior ocorrência é a sobrecarga do motor elétrico, que pode ser interpretado como de ocorrência aleatória.

4.4.2.1 - Problemas encontrados

O'Connor (2002) alerta pelo fato de que diferenças menores que 5% não necessariamente indicam que a distribuição apontada pelo teste de confiabilidade é a mais adequada, exigindo do pesquisador uma análise mais detalhada das curvas.

Isso fica claro depois de se comparar os dados da vida média esperada e dos dados da confiabilidade no período de garantia dos modelos aqui analisados (vide Tab. 9).

Tabela 9 – Vidas estimadas dos compressores estudados.

Modelo do compressor	Vida média estimada (meses)	Vida estimada para confiabilidade de 0,99 (meses)	Vida estimada para confiabilidade de 0,95 (meses)	Vida estimada para confiabilidade de 0,90 (meses)	Vida estimada para confiabilidade de 0,85 (meses)
A	62,30	5,20	9,60	13,30	16,60
B	2303,20	4,70	17,00	33,70	53,70
C	1133,50	5,90	18,20	33,40	50,30
D	99,30	4,30	9,10	13,50	17,60
E	131,40	8,20	22,70	35,70	46,90
F	422,30	6,20	27,90	54,30	81,10
G	69,10	4,30	8,40	12,10	15,35

A vida média estimada deve ser entendida como a vida do equipamento com uma confiabilidade de 50% e é utilizada para ilustrar quão longa seria a vida dos compressores baseando-se nestas distribuições selecionadas (vide fig. 35).

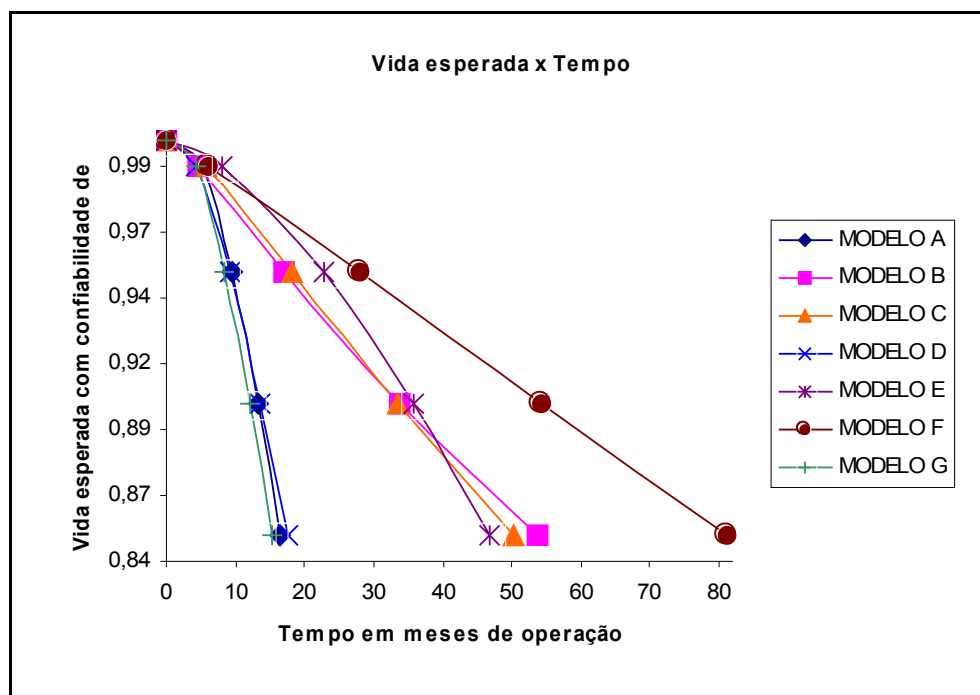


Figura 34 – Vida esperada dos compressores para o período com confiabilidade de 0,99 a 0,85.

A Fig. 34 indica que para altos valores de confiabilidade a vida atingida pelos compressores é próxima, e conforme seu valor decresce mais as curvas se distanciam entre si, isto indica um comportamento mais próximo na região onde os pontos foram interpolados que na região onde os mesmos foram estimados.

Nota-se na variação da confiabilidade em função do tempo que o comportamento dos compressores tipos A, D e G é próximo dos tipos B e C e que as curvas dos tipos E e F tem um comportamento distinto das demais e entre si.

No entanto apesar da confiabilidade dos compressores E e F serem distintas no intervalo de até 0,85 de confiabilidade, verifica-se no gráfico de vida média estimada (vide Fig. 35) que os mesmos se aproximam dos demais e quem se distancia são os compressores B e C.

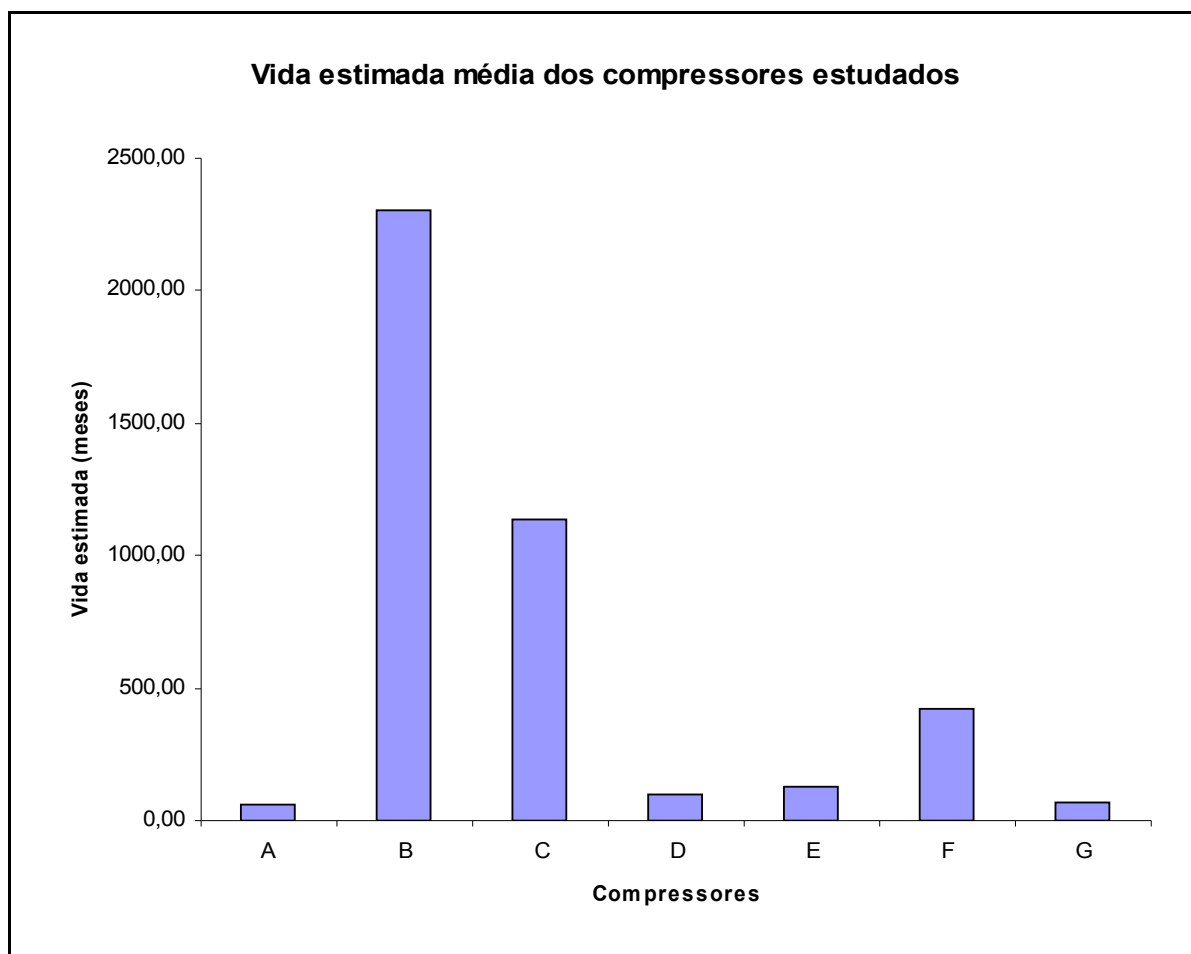


Figura 35 – Vidas médias estimadas dos compressores estudados.

Observando a Fig. 35, pode-se notar que, apesar de válidas as considerações realizadas somente sobre o comportamento dos modos de falha dos compressores e da seleção das curvas de confiabilidade e taxa de falha, os valores do coeficiente de correlação (com uma variação pequena) mostram um comportamento não esperado da vida média de alguns compressores (modelos B e C), passando dos 1000 meses de operação, sem se considerar manutenção.

Este fato pode ser decorrente destes compressores terem uma maior produção que os demais apresentando assim uma baixa relação falha por equipamento produzido. No entanto, o compressor com maior produção e número de unidades sobreviventes é o modelo E, que não apresenta este aspecto destoante na avaliação da sua vida média.

Isso indica que dados considerados como menos relevantes, como algumas peculiaridades construtivas e de uso, não devem ser negligenciadas e irão ser novamente abordadas.

4.4.3 – Reavaliação dos modos de falha

As primeiras considerações realizadas levaram em conta o coeficiente de correlação e os modos de falha verificados para cada equipamento. No entanto, notou-se que essa não foi a melhor alternativa para seleção da distribuição de confiabilidade e descrição do comportamento de cada componente.

Então uma nova opção foi feita excluindo-se da seleção o coeficiente de correlação e observando-se com mais cuidado os modos de falha.

Uma observação que vale ser citada é o fato de não se incluir, diretamente nesta seleção, as características construtivas mencionadas no início deste capítulo. Isto não foi feito devido ao fato que as mesmas indiretamente já estarem incluídas no estudo através dos modos de falha por elas influenciadas.

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. 10).

Uma ferramenta que será novamente utilizada é o diagrama de Pareto. Na primeira parte do desenvolvimento deste trabalho, foram realizados estudos dos modos de falha de compressores e sua ocorrência, no intuito de fornecer subsídios para elaboração do FMEA desses equipamentos.

Neste ponto, o Diagrama de Pareto será executado com algumas mudanças, que serão abordadas junto com os aspectos construtivos de cada modelo para permitir, de uma forma individual, agrupar-se os compressores em grupos onde as diferenças de maior relevância permitirão selecionar a distribuição mais adequada (Lognormal ou de Weibull).

Tabela 10 – 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. 10 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.

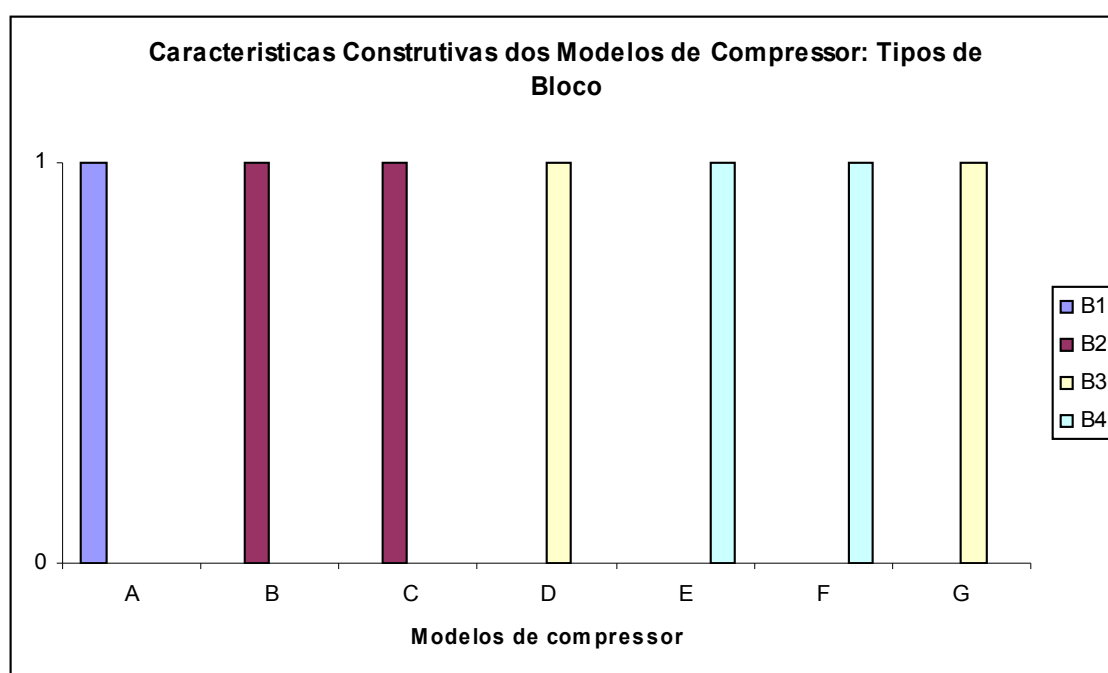


Figura 36 – Características construtivas/ tipos de blocos dos compressores.

A Fig. 36 apresenta os compressores por tipo de bloco, ou seja, eles estão separados conforme suas características construtivas, podendo ser divididos em famílias (as características destas famílias podem ser vistas na Tab. 10 e serão melhor abordadas adiante).

Estas famílias possuem pistões, cursos e cabeçote semelhantes, podendo apresentar motores e número de pistões distintos. Este último aspecto influencia diretamente na vazão e potência do compressor, mas não necessariamente na sua utilização em aplicações distintas. Em compressores geometricamente semelhantes que

se diferem apenas pela potência, a aplicação dos mesmos é distinta, como já foi discutido quando apresentadas as diferenças de aplicações.

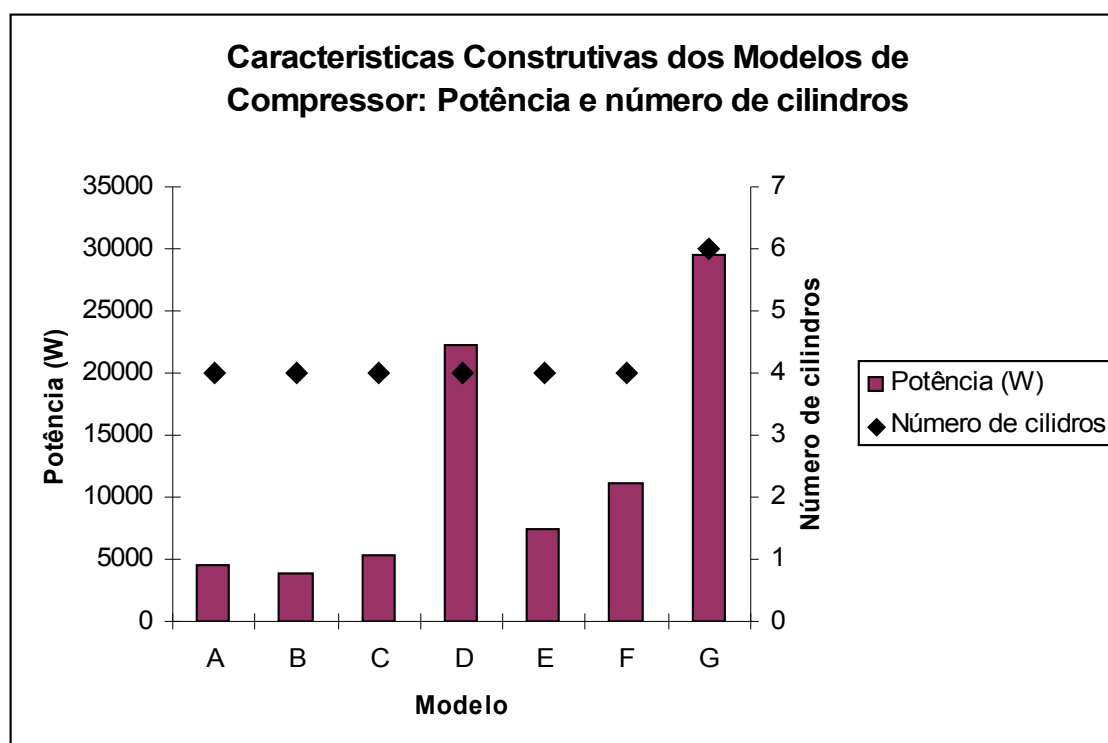


Figura 37 – Características construtivas/ potência e numero de cilindros dos compressores.

Na Fig. 37, pode-se verificar a variação do número de cilindros e potência para os diversos modelos. Como já mencionado anteriormente, 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.

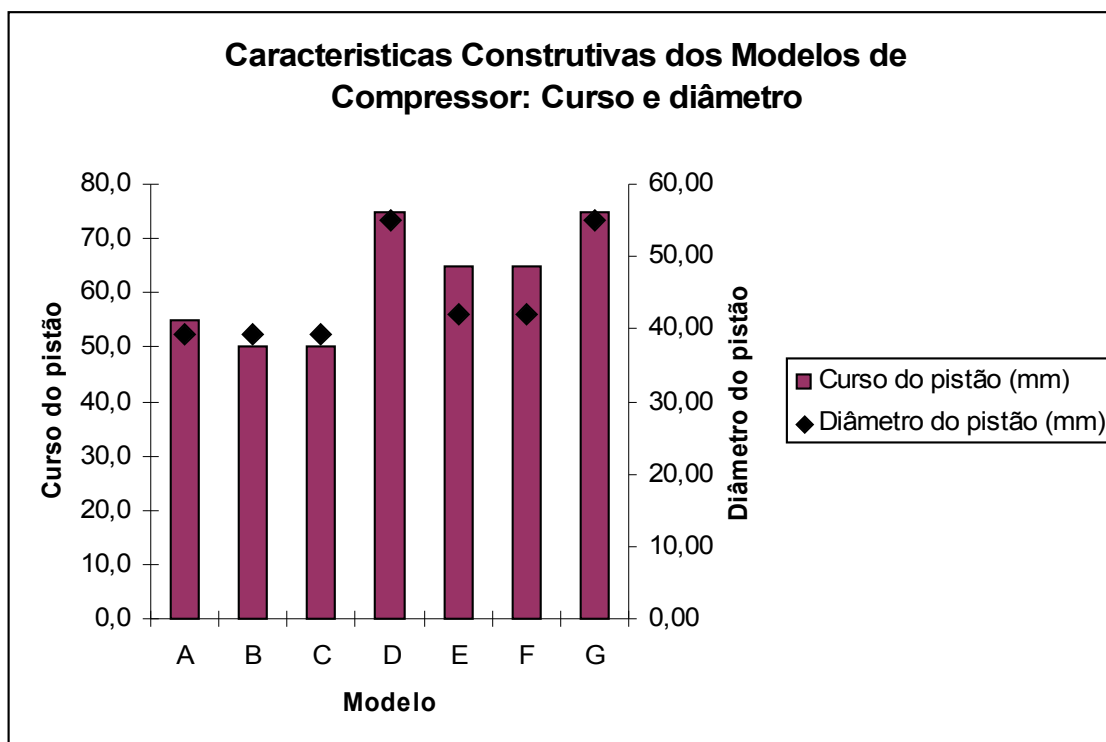


Figura 38 – Características construtivas/ potência e numero de cilindros dos compressores.

A Fig. 38 demonstra que compressores distintos podem apresentar geometria semelhante com 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. 37, 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. 36, 37 e 38, 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, se obtendo o 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.

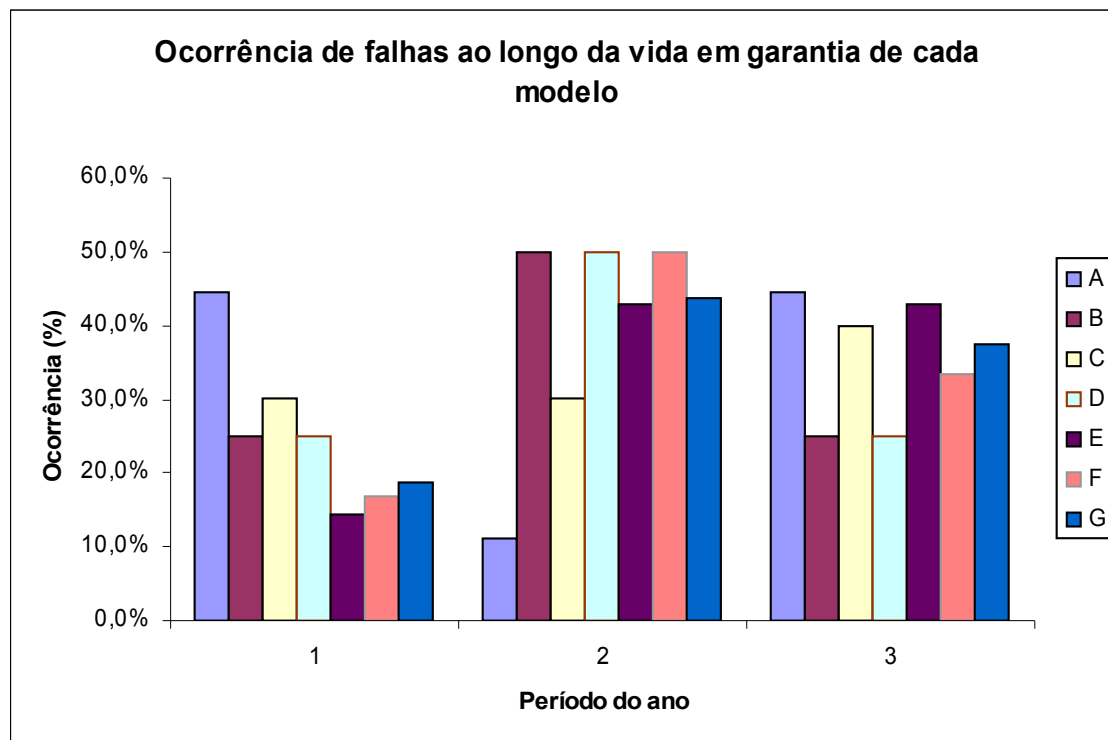


Figura 39 – Ocorrência de falhas ao longo da vida em garantia de cada modelo de compressor.

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 podem ser agrupados (como já comentado no anexo 1). Sua origem provável foi a própria instalação do equipamento.

Uma outra alternativa seria contaminação durante uma manutenção, pouco provável dada a 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 pode ser agrupado é o Golpe de Líquido. No Diagrama de Pareto visto anteriormente, foi feita a união do golpe de líquido com seu modo de falha de origem (vide anexo 1), sendo considerado o golpe de líquido como efeito. Todavia, nessa parte do estudo é mais interessante a análise da ação e seu efeito, do que a origem do modo de falha, podendo desse modo ser realizado o agrupamento dos “Golpes de Líquidos” em um único modo de falha.

O efeito dos modos de falhas verificados no FMEA, apresentados no anexo, 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, como já estipulado, podem ser 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 (ver apêndice 1).

Outro fato de grande importância é o período do ano em que a falha ocorreu, como podemos ver no FMEA no anexo 1. Muitos modos de falha são influenciados pelo clima externo ao qual o equipamento é submetido. No entanto, os equipamentos aqui analisados vieram de todas as regiões do Brasil, que apresenta, em seu território, grande variação de temperatura devido a sua grande extensão. Com base nisso, há uma imprecisão das informações contidas nos relatórios de manutenção. Portanto a análise relativa ao período do ano não será realizada.

Além disso 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, a mesma se apresenta maior no segundo semestre no caso destes compressores.

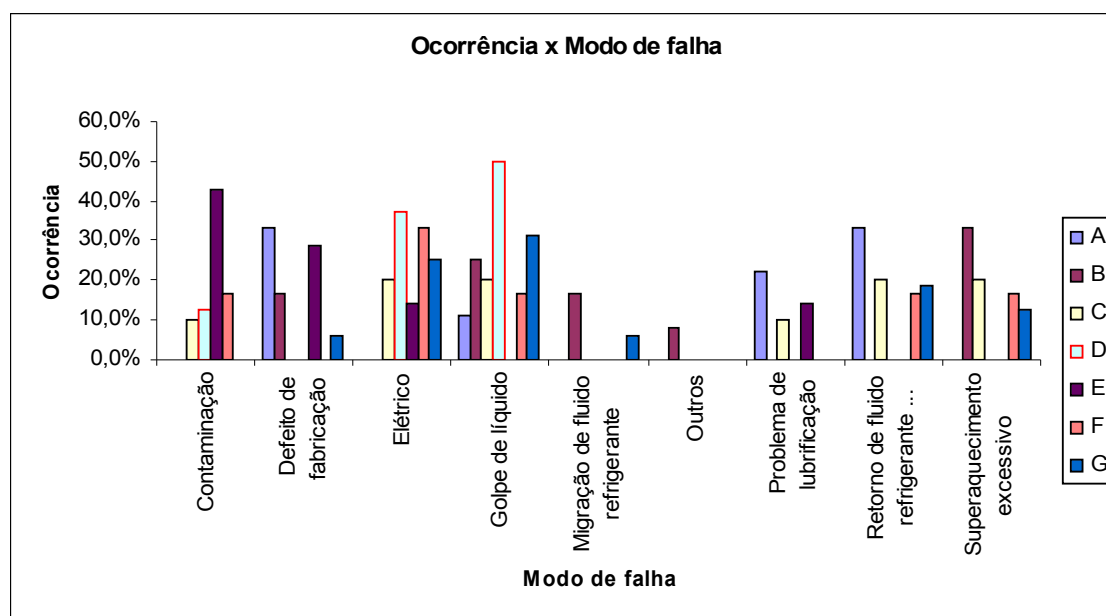


Figura 40 – Ocorrência dos modos de falha dos compressores.

Em seguida será feito um novo agrupamento dos compressores aqui analisados. Para facilitar a visualização e entendimento, optou-se por apresentar os efeitos de cada modo de falhas separadamente (efeitos em primeiro nível).

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. 41.

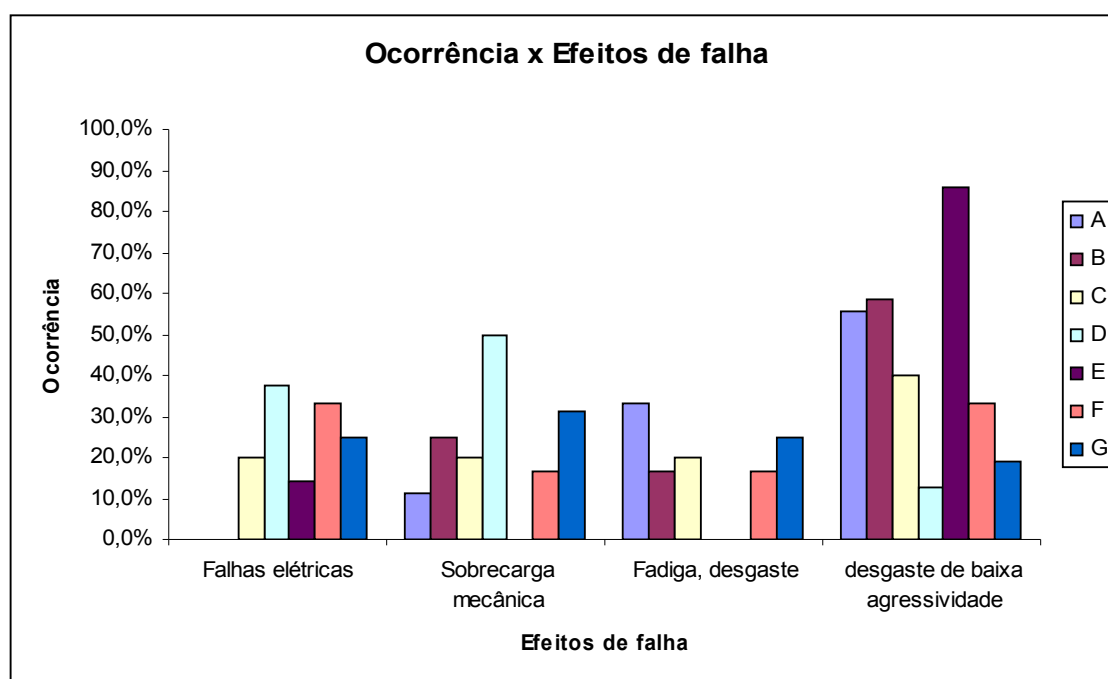


Figura 41 – Ocorrência dos efeitos de falha dos compressores.

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 seguir são apresentadas as considerações para a escolha da curva mais adequada para cada modelo de compressor.

4.4.3.1 - Modelo A

Com base nas curvas obtidas para o modelo A, verifica-se que a distribuição mais adequada segundo seus modos de falha e efeitos é a lognormal (como será abordado no item 4.4.4 Curvas selecionadas). Este compressor apresenta elevada participação de fadiga e desgaste entre os efeitos dos modos de falha. Sua taxa de falha da distribuição de Weibull demonstra comportamento mais agressivo, que não é verificado pelos tipos de modos de falhas encontrados, enquanto sua taxa de falha se comporta segundo a distribuição lognormal.

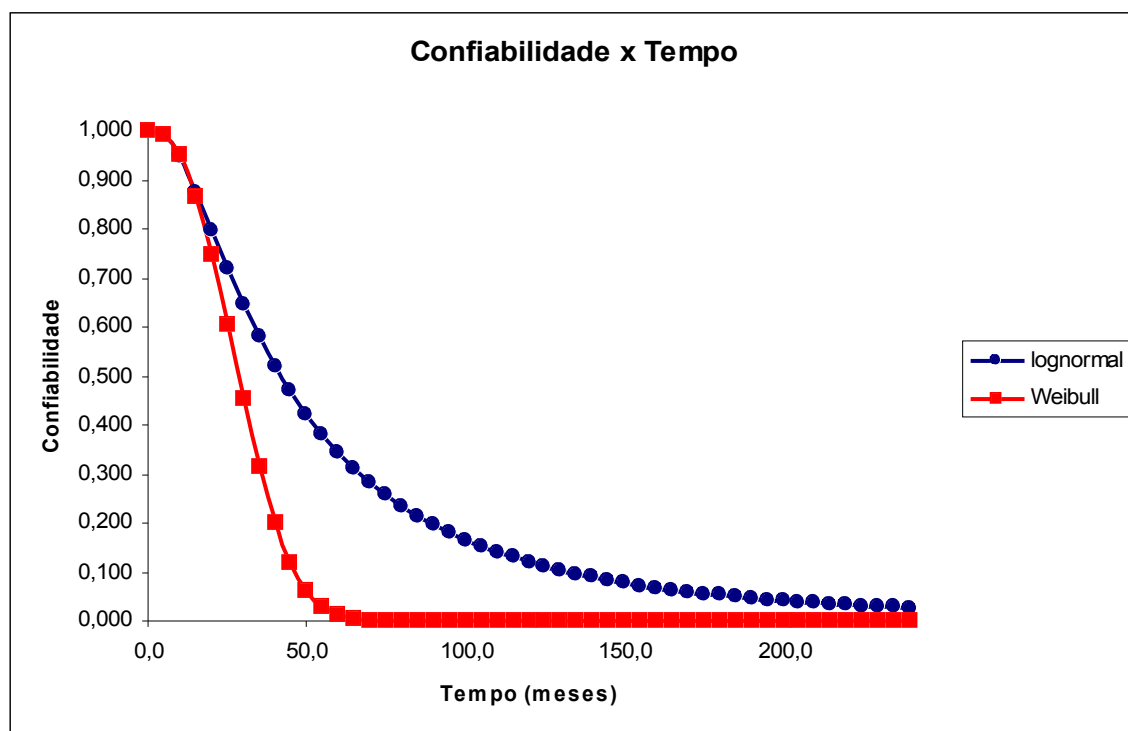


Figura 42 – Curvas de confiabilidade do compressor A.

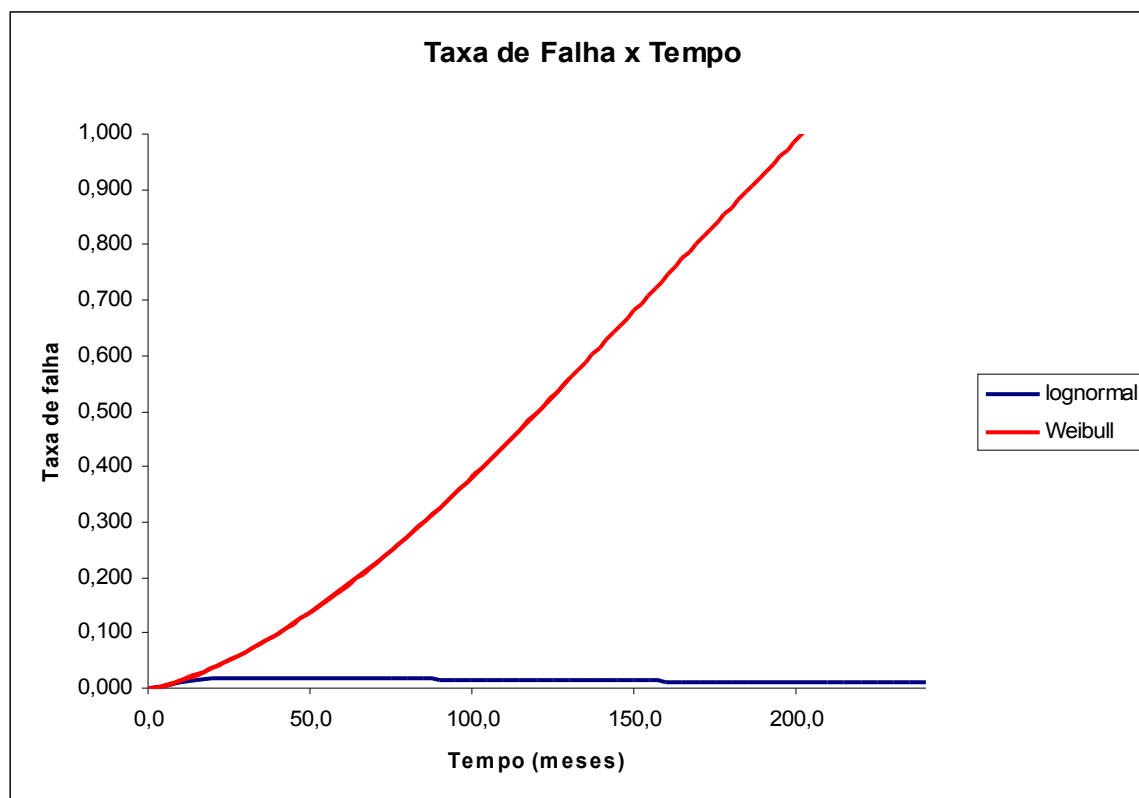


Figura 43 – Curvas de taxa de falha do compressor A.

4.4.3.2 - Modelo B

O compressor B apresenta níveis maiores de confiabilidade segundo a distribuição lognormal. No entanto, quando se observa a taxa de falha decrescente apresentada por esse compressor nesta distribuição, verifica-se que a taxa de falha tende a ser constante ao longo do tempo. Esta distribuição mostra-se a mais adequada, dado a diversidade da ocorrência dos modos de falhas do equipamento, que apresenta desgaste menos agressivo e sobrecarga como modos de falhas principais.

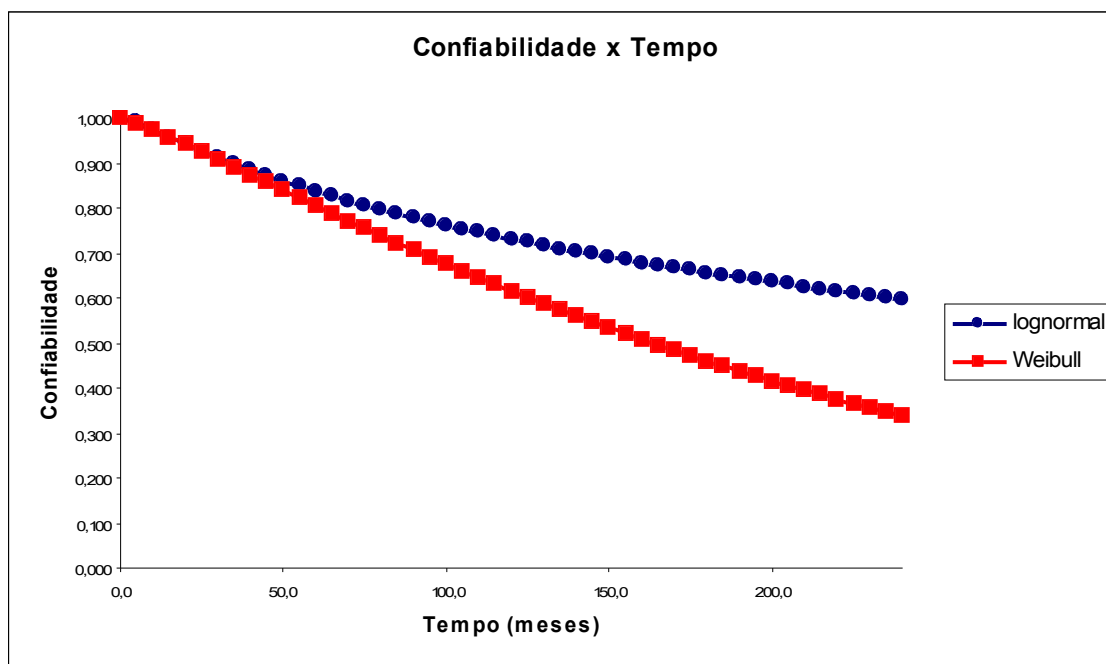


Figura 44 – Curvas de confiabilidade do compressor B.

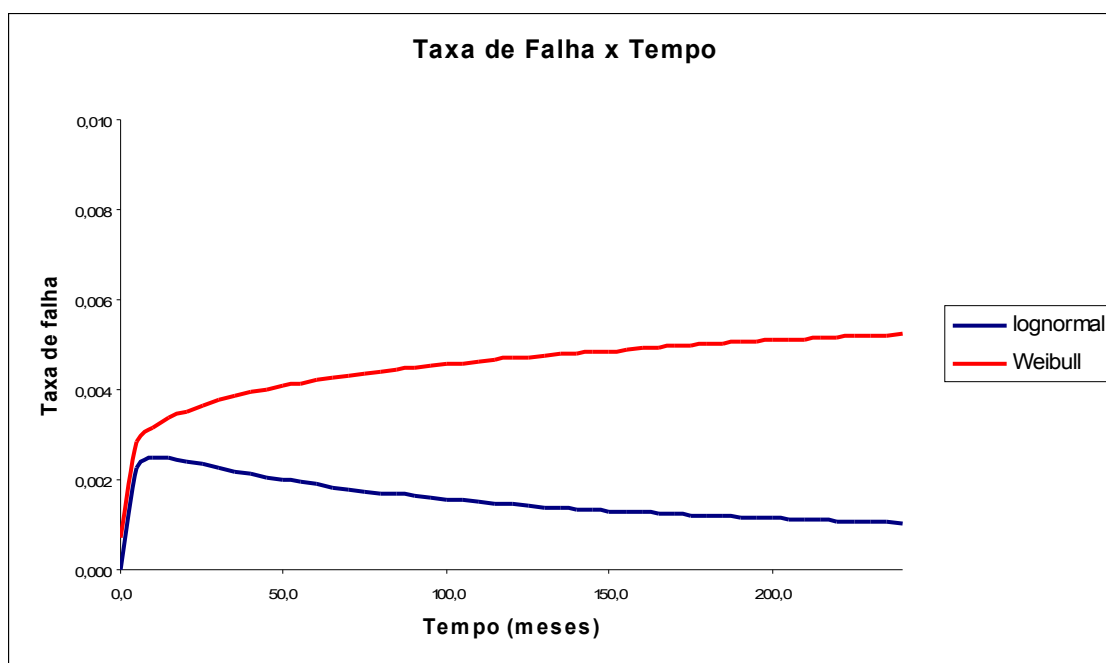


Figura 45 – Curvas de taxa de falha do compressor B.

4.4.3.3 - Modelo C

Como verificado para o compressor B, a distribuição que melhor se correlaciona com o compressor C é a de Weibull. Isto pode ser explicado pois os efeitos dos modos de falhas deste compressor apresentam a mesma ocorrência que o compressor B.

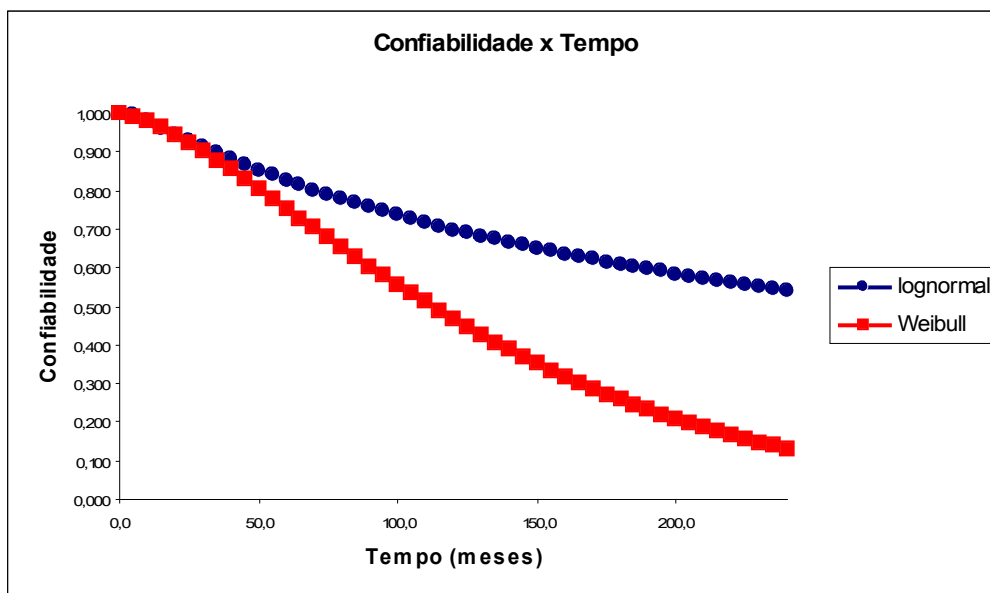


Figura 46 – Curvas de confiabilidade do compressor C.

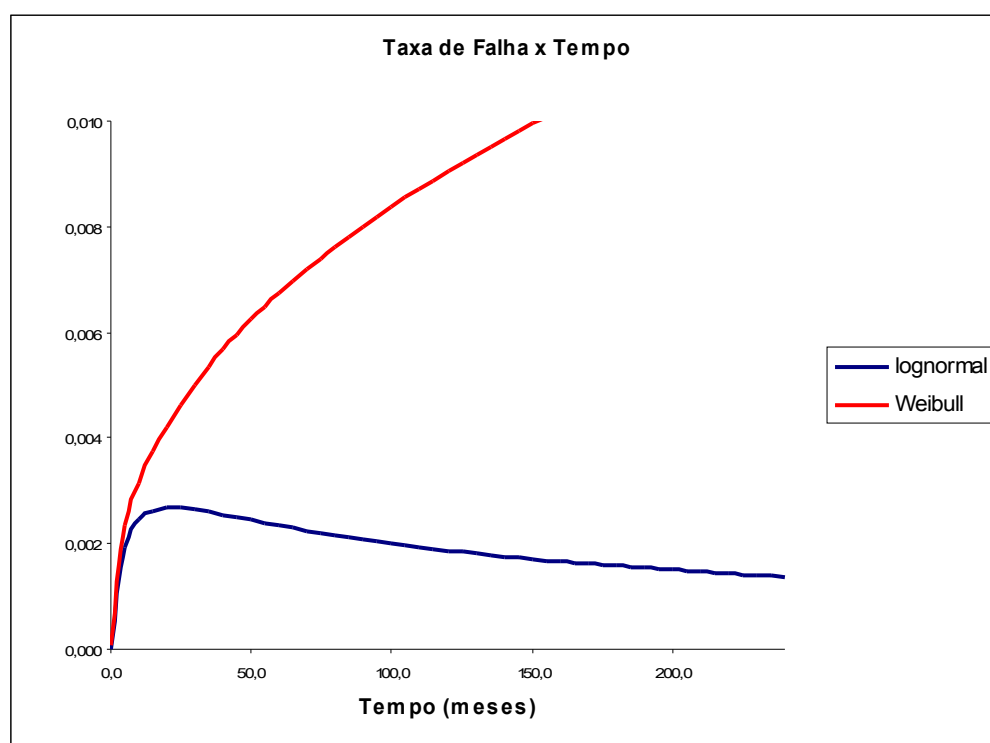


Figura 47 – Curvas de taxa de falha do compressor C.

4.4.3.4 - Modelo D

O compressor de modelo D apresenta grande ocorrência de sobrecarga, golpe de líquido, e também possui elevada ocorrência de problemas aleatórios de origem elétrica. Estes dois modos de falha são melhor representados pela distribuição de Weibull, quando observada as curvas de taxa de falha e confiabilidade. Nota-se que novamente para modos de falha mais agressivos, a curva a ser selecionada em função do comportamento apresentado é a de Weibull.

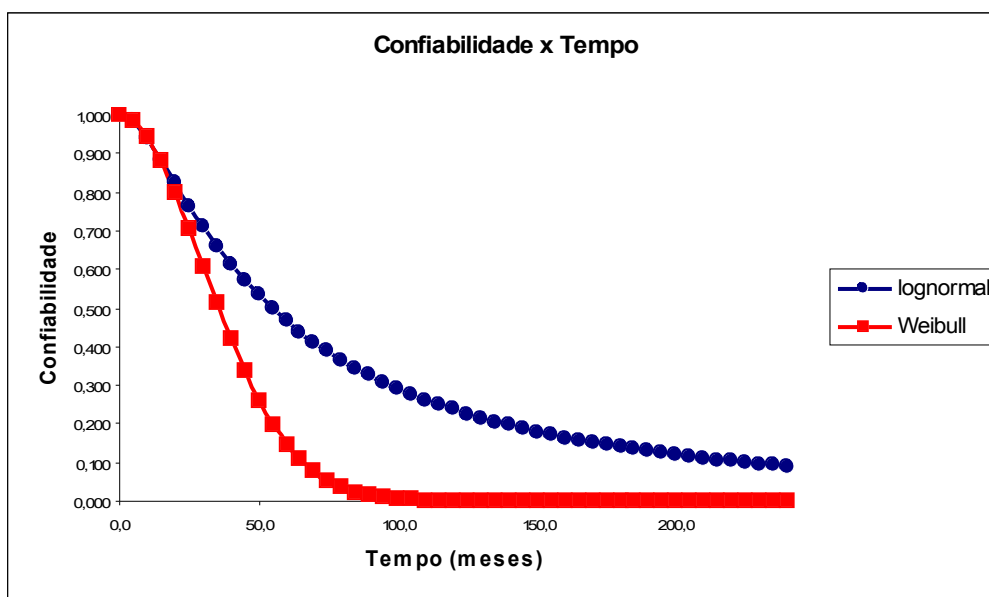


Figura 48 – Curvas de confiabilidade do compressor D.

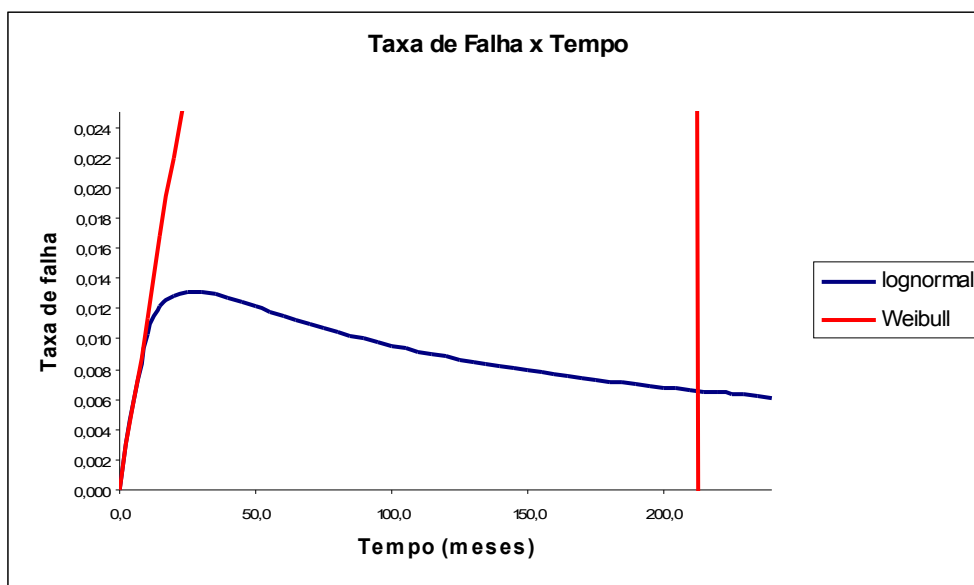


Figura 49 – Curvas de taxa de falha do compressor D.

4.4.3.5 - Modelo E

No caso do compressor modelo E, ao verificar-se as curvas, os modos de falhas e seus efeitos nota-se um comportamento similar ao do compressor C na maioria dos seus aspectos. Logo a distribuição de Weibull se mostra a mais adequada para este tipo de compressor.

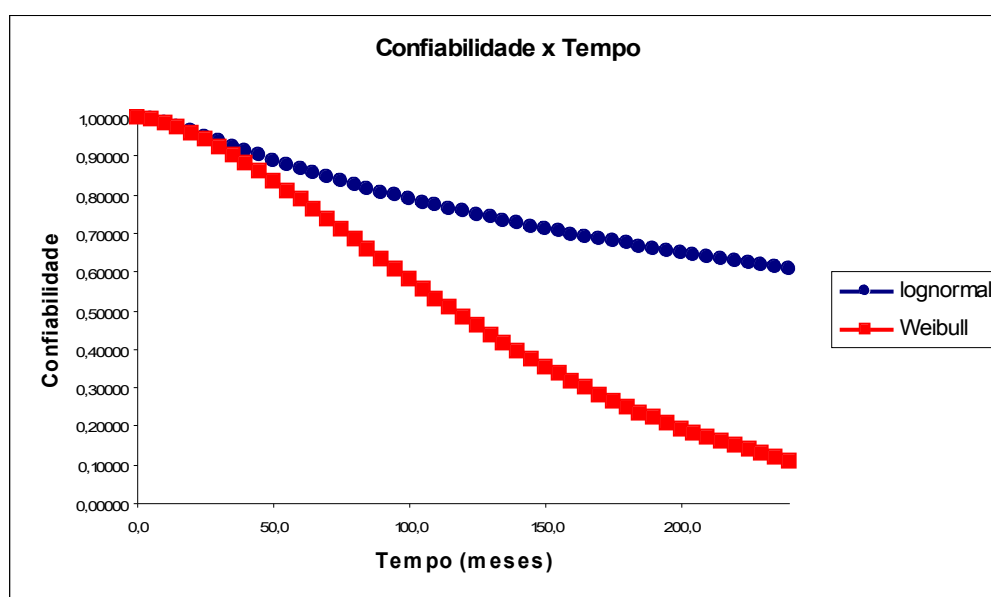


Figura 50 – Curvas de confiabilidade do compressor E.

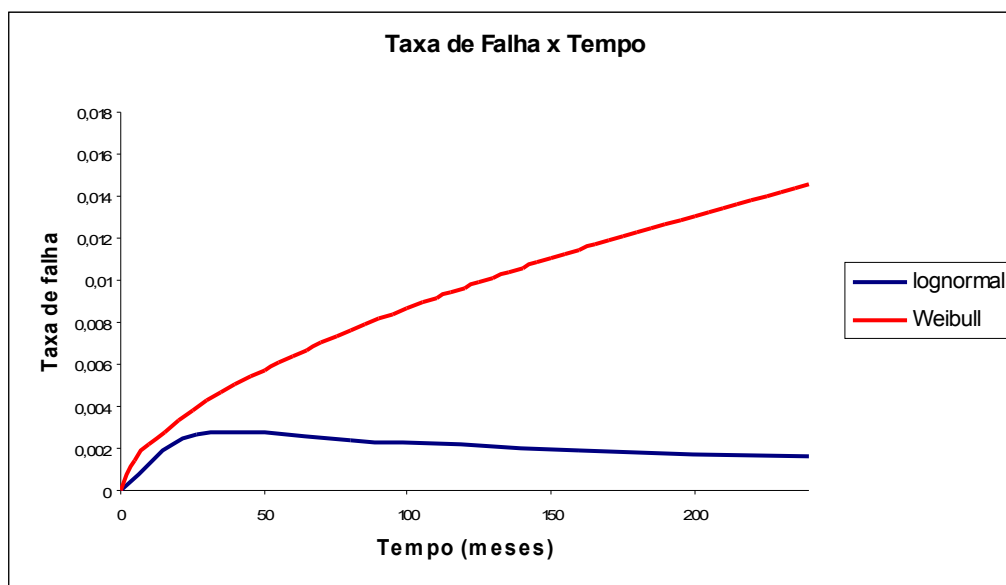


Figura 51 – Curvas de taxa de falha do compressor E.

4.4.3.6 - Modelo F

O comportamento apresentado pelas curvas do compressor F é muito próximo ao verificado no compressor B. Vale ressaltar que neste compressor seu principal modo de falhas é o aleatório de origem elétrica. Isto pode ser facilmente compreendido por meio da análise do comportamento da taxa de falha ser quase linear. Este comportamento é ratificado ao observar-se o valor do parâmetro de forma da distribuição de Weibull, que é praticamente igual um (1,08).

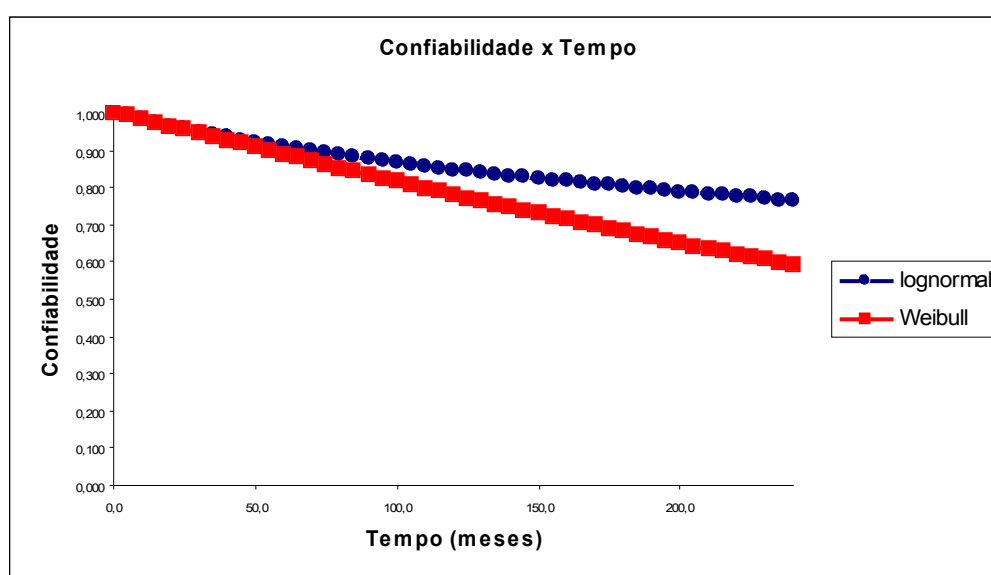


Figura 52 – Curvas de confiabilidade do compressor F.

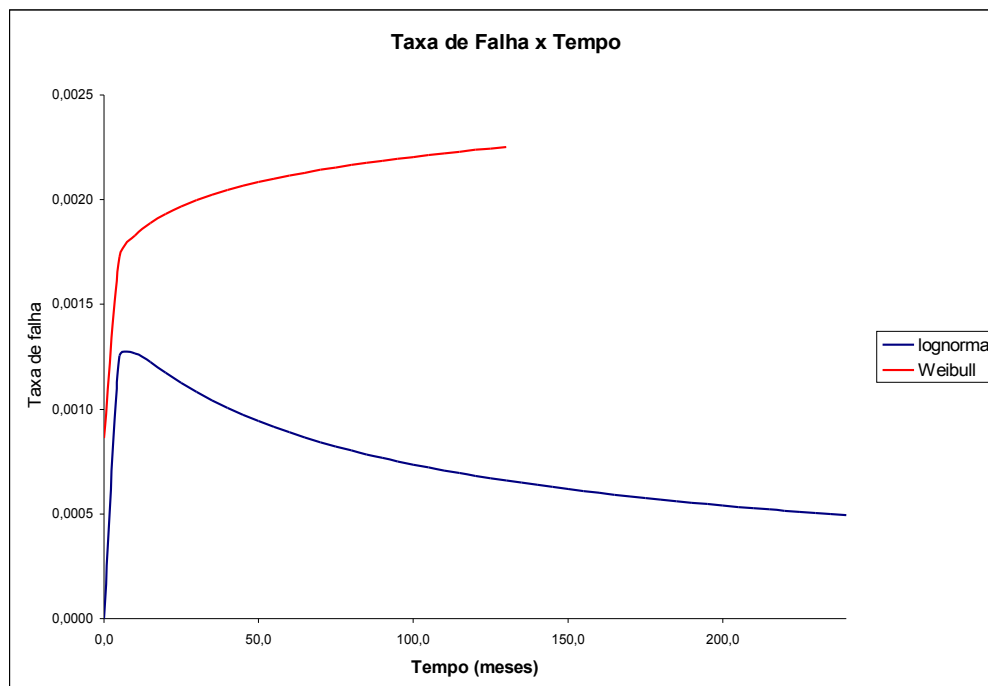


Figura 53 – Curvas de taxa de falha do compressor F.

4.4.3.7 - Modelo G

Dadas as semelhanças dos compressores D e G em vários parâmetros, este segundo, como no caso do compressor D, é melhor representado pela distribuição de Weibull.

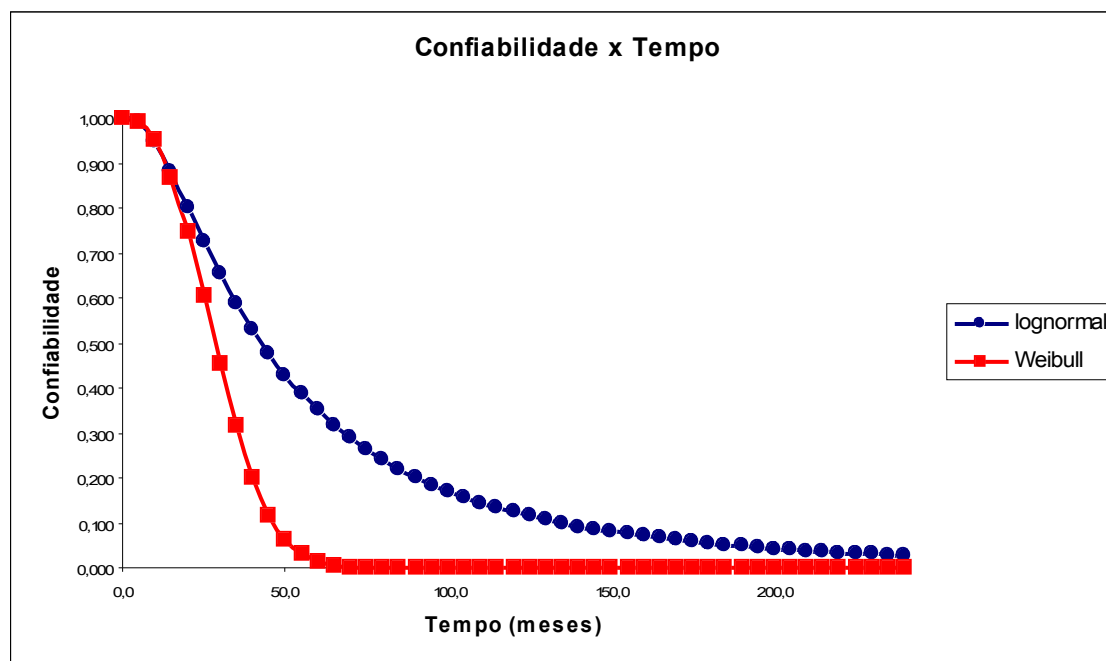


Figura 54 – Curvas de confiabilidade do compressor G.

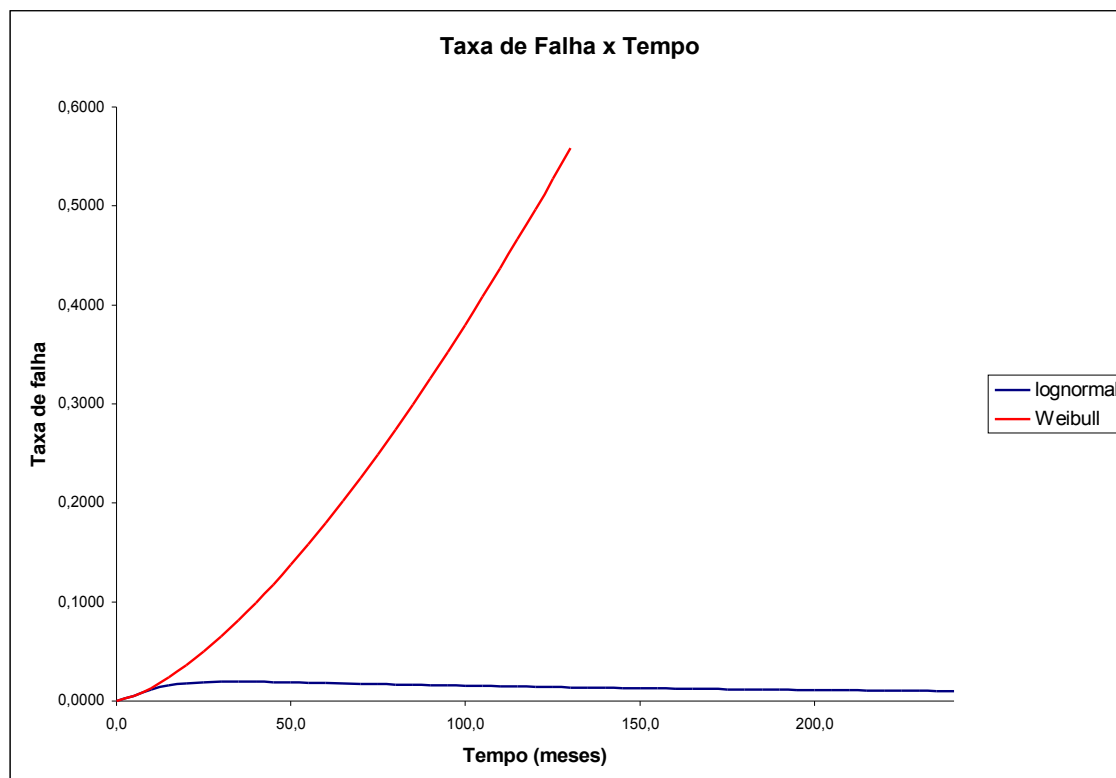


Figura 55 – Curvas de taxa de falha do compressor G.

4.4.4 - Curvas selecionadas

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. A ocorrência dos seus modos de falhas são similares (nos modos de falha mais semelhantes), 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.

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

O compressor A apresenta a distribuição lognormal e não pode ser comparado aos demais, principalmente pelo fato dos seus modos de falhas dominantes serem devido

à retorno de fluido refrigerante no estado líquido (fato apenas verificado neste compressor). Seu comportamento está mais próximo ao 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). 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 (vide desenvolvimento, curva de banheira). Isto deveu-se 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, de comum apresentam apenas o fato de ambos sofrerem os efeitos de modos de falhas de forma bem distribuída ao longo do ano, 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, 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.

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

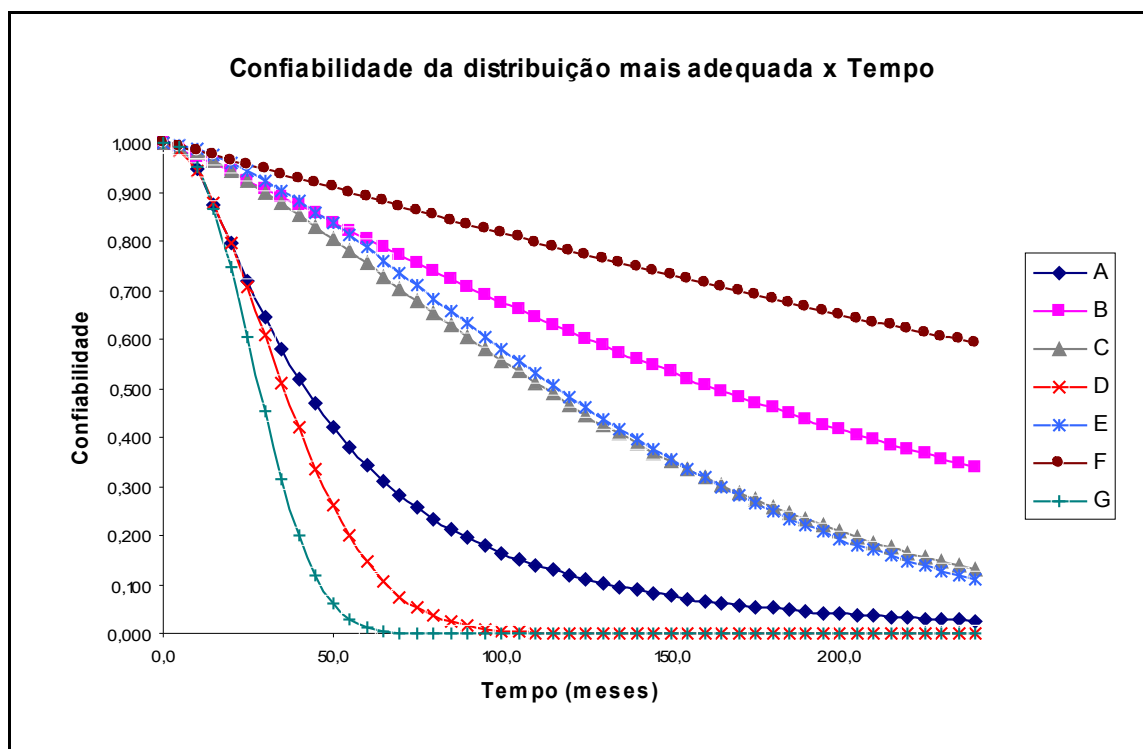


Figura 56 – Curvas de confiabilidade selecionadas dos compressores.

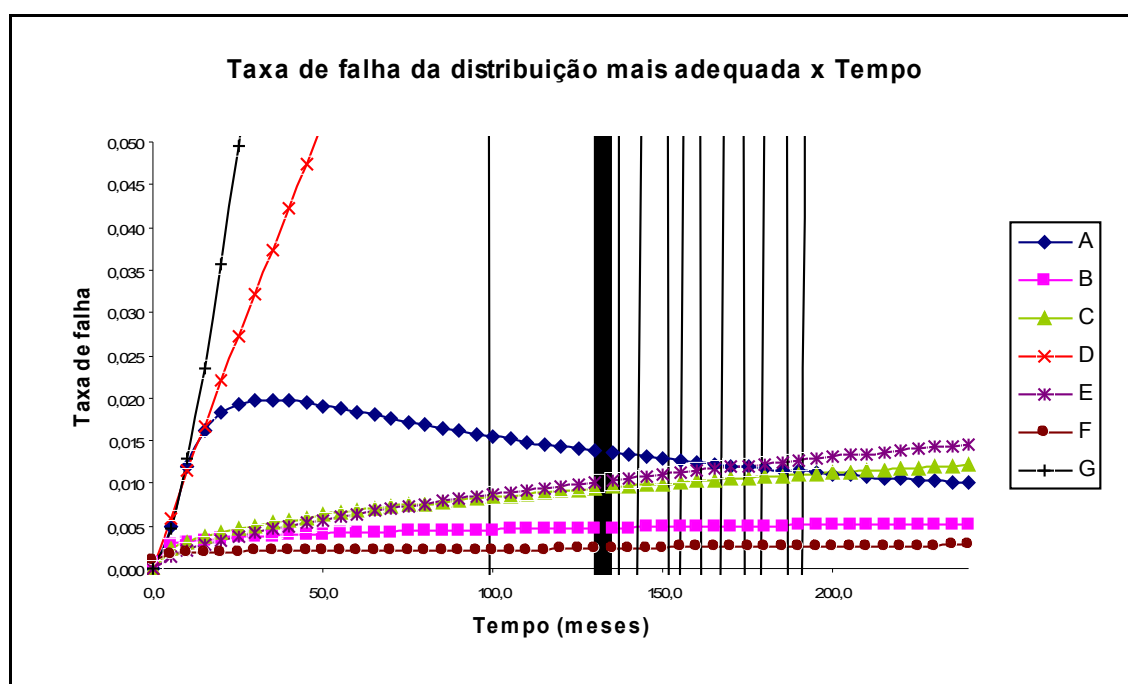


Figura 57 – Curvas de taxa de falha selecionadas dos compressores.

4.4.5 - Considerações finais

Uma consideração inicial quanto ao comportamento dos modos de falha de compressores semi-herméticos de sistemas de refrigeração, é que este varia conforme a aplicação do equipamento. Verificou-se também que os modos de falha dos compressores são melhor descritos ou representados pela curva de taxa de falha, enquanto que a curva de confiabilidade descreve melhor as divisões baseadas nas características construtivas, principalmente a razão de compressão.

Usualmente adota-se, para efeito de referência em estudos de confiabilidade, a vida estimada com confiabilidade de 0,90 para definição do período de garantia de equipamentos mecânicos no geral. Dessa forma, realizou-se este cálculo e os valores encontrados para os compressores em estudo estão apresentados na Tab. 11. Verifica-se que para este nível de confiabilidade adotar-se a distribuição lognormal ou Weibull é indiferente, a menos do compressor F que apresentou uma variação significativa devido aos seus modos de falha se comportarem de forma aleatória.

Tabela 11 – Vida estimada do compressor com uma confiabilidade de 0,90 (os valores destacados na tabela assinalam a distribuição adotada em cada modelo).

Vida para confiabilidade de 0,90		
Modelos	Distribuição adotada	
	Lognormal	Weibull
A	1,1	1,1
B	2,8	2,7
C	2,8	2,5
D	1,1	1,1
E	3,7	3,0
F	5,6	4,5
G	1,1	1,1
Vida estimada em anos		

Pode-se concluir que a totalidade dos compressores estudados cumpriria o período de garantia de 1 (um) ano com vida estimada com uma confiabilidade de 0,9.

5. - Conclusões

5.1 – Considerações sobre o trabalho

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.

O uso das ferramentas da confiabilidade para sistemas de refrigeração é ainda mais raro, todavia foram encontrados alguns trabalhos que abrangem este tema. No entanto observou-se que um mesmo modo de falha é abordado de forma diferente conforme cada autor. Myrefelt (2004) considera os modos de falha de todos os componentes de sistemas de refrigeração como aleatórios, Yan-Qiao et al (1996) os analisa com a distribuição de Weibull e Nutter et al (2002) trata todos os compressores como equipamento eletromecânico que seguem a distribuição lognormal.

A análise da forma como proposta para a pesquisa aqui desenvolvida onde se avalia as principais ocorrências de falhas em equipamentos de refrigeração, principalmente compressores, só foi encontrada no trabalho de Nelson et al (1989), onde é apresentada uma metodologia para auxiliar os projetistas destes componentes com o uso de ferramentas da confiabilidade.

Constatou-se durante a revisão bibliográfica um pequeno número de estudos sobre a ocorrência de falhas de compressores alternativos de sistemas de refrigeração. Os dois mais completos disponíveis foram realizados por fabricantes na forma de material de apoio ao pessoal do setor de manutenção.

Constatou-se que a origem da maior parte dos modos de falha em compressores está relacionada com deficiências do projeto do sistema ou de sua operação. Portanto, quando uma falha não é encontrada e o compressor é apenas substituído, é muito provável que o mesmo problema ocorra novamente.

O modelo proposto neste trabalho para compressores semi-herméticos de sistemas de refrigeração não foi encontrado explicitamente em nenhum outro trabalho na revisão bibliográfica realizada. No entanto, estão disponíveis estudos mais simples ou mais complexos, porém envolvendo outros equipamentos da área de refrigeração.

A aplicação do FMEA completo em manutenção não foi encontrada em quaisquer outros trabalhos. Usualmente este recurso é utilizado nos trabalhos de confiabilidade para o estudo das falhas, modos de falhas e suas causas e efeitos. O estudo de ocorrências com o uso do diagrama de Pareto foi encontrado, todavia não na análise dos compressores aqui apresentados.

O estudo da confiabilidade abordando diferentes distribuições estatísticas foi apenas encontrado em um trabalho, onde foi utilizada apenas a regressão linear. No presente trabalho, a regressão linear é realizada num primeiro momento para a seleção da distribuição mais adequada, junto com métodos de verificação (como o coeficiente de correlação) para depois se estimar os parâmetros com o método da máxima verossimilhança.

A confiabilidade mostrou-se uma importante ferramenta para a manutenção, pois, através do FMEA e da revisão dos principais modos de falha e do estudo de confiabilidade propriamente dito, foi possível notar que estes equipamentos necessitam de manutenção para que possam atingir sua vida esperada.

Mesmo não se podendo corrigir todos os modos de falha, antes deles se tornarem falhas, a manutenção surge como uma importante forma de minimizar seus efeitos.

A manutenção preventiva se faz necessária, principalmente na forma de inspeção de parâmetros de operação, limpeza e regulação dos equipamentos, pois estas máquinas variam conforme o comportamento do sistema onde estão instaladas e este varia conforme a aplicação, características climáticas da região e do uso. Deve-se ressaltar que não foram abordados os aspectos relacionados com elementos de desgaste ou consumíveis em compressores. Isto provavelmente mudaria o comportamento verificado nas curvas de confiabilidade e exigiria uma ampliação significativa do escopo do trabalho apresentado.

Neste ponto confirma-se a importância do Diagrama de Pareto para hierarquização dos modos de falha e do FMEA como fonte de informação para o estabelecimento de rotinas e procedimentos. Os parâmetros de operação a serem observados, os intervalos entre as inspeções e mesmo os pontos mais vulneráveis do sistema de refrigeração não só do compressor alternativo, podem ser conseguidos com estas análises.

A manutenção corretiva em muitos casos é a única que pode ser aplicada, e pode ser otimizada com a elaboração de procedimentos e treinamento do pessoal de

manutenção e operação. Parte dos modos de falha apresenta comportamento aleatório e somente esta modalidade de manutenção se mostra efetiva. No entanto, estes modos de falha, como pode ser verificado no FMEA, permitem o uso de dispositivos de proteção.

Para a manutenção preditiva existem duas vertentes: uma para equipamentos simples de baixa responsabilidade e outra para equipamentos de alto custo ou elevada responsabilidade. No segundo caso, o investimento em sensores e sistemas inteligentes de monitoramento e controle é imprescindível, e os custos devem ficar em segundo plano. Já no primeiro caso, o custo se mostra de maior importância, pois os equipamentos e sistemas de proteção podem facilmente ultrapassar o valor do próprio sistema de refrigeração. Neste caso aplica-se o que foi proposto por Braun (2003) onde é utilizado um sistema simples monitorando apenas pressão e temperatura na entrada e saída dos principais equipamentos instalados (compressor, evaporador e condensador). Com este monitoramento associado à metodologia do FMEA é possível realizar ações de manutenção preventiva e preditiva de forma menos onerosa, aumentando a autonomia do encarregado da manutenção.

5.2 – Conclusão: Resumo dos resultados

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo das principais falhas, modos de falha de compressores semi-herméticos alternativos de sistemas de refrigeração, suas ocorrências e o comportamento destes equipamentos no seu período de garantia sob a ótica da confiabilidade. Ele foi atingido a partir do levantamento das principais falhas e modos de falha de compressores alternativos semi-herméticos na literatura disponível.

Com estes dados e os relatórios de manutenção obtidos junto a uma empresa de manutenção, foram realizados levantamentos de campo da ocorrência das principais falhas e modos de falha aos quais estes equipamentos estão sujeitos.

Com este levantamento foi possível a execução de um diagrama de Pareto, para esclarecer quais os modos de falha são mais comuns nos compressores estudados (Retorno de fluido refrigerante no estado líquido e Superaquecimento excessivo) e portanto devem ser cuidados com maior atenção pelo pessoal responsável pela manutenção.

Na sequência foi realizado um estudo dos modos de falha com o uso da ferramenta Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) para se conhecer as causas

destes modos de falha e seus efeitos bem como as ações a serem tomadas para se evitar ou minimizar seus efeitos e ocorrência. Conclui-se que o FMEA fornece subsídios para elaboração de procedimentos (para manutenção preventiva e corretiva) e até mesmo para um sistema de monitoramento (manutenção preditiva).

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.

5.3 - Sugestões para trabalhos futuros

As seguintes sugestões para trabalhos futuros foram divisadas ao final deste estudo.

O levantamento dos dados de falha de campo deve ser realizado com uma melhor base de dados, mais informações sobre a instalação e operação, mais informação para análise. Dessa forma, para futuros estudos, recomenda-se que o responsável pelo estudo deva realizar fichas detalhadas, mas simples, a serem preenchidas pelos responsáveis pela operação e manutenção. Estas fichas devem englobar informações sobre as condições de operação do sistema, condições ambientais de onde e como o equipamento está instalado e qualquer anomalia notada antes da falha ou do modo de falha ser constatado.

Realização do diagrama de Pareto não só com a ocorrência dos modos de falha, mas também com os valores de reparo de cada compressor danificado.

Expandir o FMEA para um FMECA, acrescentando-se os índices de criticidade e ocorrência. Desta forma, o FMEA pode tornar-se uma ferramenta quantitativa da confiabilidade.

O estudo de confiabilidade deve ser realizado com um período maior de observação e acompanhamento dos compressores, para diminuir a incerteza da vida estimada dos compressores.

Sugere-se realizar estudos visando uma análise técnica econômica de sistemas de refrigeração com o uso de ferramentas de análise de risco para fundamentar melhor o planejamento da área de manutenção.

6. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aldemir, T.; Hilsmeier, T.A.; Vesely, W.E.; Time dependent unavailability of aging standby components based on nuclear plant data. Source: Reliability Engineering and Safety 47, 199 – 205. Elsevier science Limited. EUA, 1994.

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.

Amoako-Gyampah, K.; Vineyard, M.; Meredith, J.R.; Failure rate distribution for flexible manufacturing systems: An empirical study. European Journal of Operational Research 116 (1999), 130 – 155. Elsevier Science B.V. 1999.

Air conditioning, heating e refrigeration news. Your compressor's worst nightmare, ABI/INFORM Global, 2000.

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.

Breuker, M.S.; Braun J.E.; Common faults and their impacts for rooftop air conditioners. HVAC & Research, V. 4, n. 3, 10 p. EUA, 1998.

Bowles, J. B.; New SAE FMECA standard. Source: Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim, CA, USA, 1998.

Braun, James E. - Automated fault detection and diagnostics for vapor compression cooling equipment. Transactions of ASME, ASME 2003.

Bressan, G.; Modelagem e simulação de sistemas computacionais. LARC-PCS/EPUSP, 2002.

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. Brasil 2000.

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.

Cardoso, I.A.P.; *Desenvolvimento de método para seleção de políticas de manutenção baseado em análise de risco*. Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em engenharia. Brasil 2004.

Carter, A. D. S.; Mechanical reliability. 2nd ed. 492 p., Ed. Macmillan, London, 1986.

Checket-hanks, B.; Determining the cause of death. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 2003.

Freitas, M.A., Colossimo E.A.; Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. Ed. Fundação Christiano Ottoni, 309 p. Belo Horizonte, 1997.

Clarotti, C.; Lannoy, A.; Odin, S.; Procaccia, H.; Detection of equipment aging and determination of the efficiency of a corrective measure. Reliability Engineering and Safety 84, pp 57 – 64, Elsevier Ltd. 2004.

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.

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.

Corrêa, H. L. e Corrêa, C. A.; Administração de produção e operações manufatura e serviços; uma abordagem estratégica. Ed. Atlas, São Paulo, 2004.

Dhillon, B.B.; Optimum life cycle and labour costs estimation of repairable equipment. *Microelectronic Reliability*, vol. 36, Nº 2, pp 227 – 229. Elsevier Science Ltd. Great Britain, 1995.

Embraco; Revista Bola Preta nº83. Brasil, 2005

Evans, J. R.; Production/operations management quality, performance, and value. 5th ed.; Ed. West Pub. Co., Minneapolis/St. Paul, 1997.

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.

Gauge, S.; The compressor mysteries. *Ar conditioning, heating e refrigeration news*, ABI/INFORM Global, Apr 28, 2003. Vol. 218, Iss. 17; p. 1 (3 pages).

GTZ – Agencia de cooperação técnica Alemã; Proklima: Boas praticas de refrigeração. Montreal protocol unit, Brasil, 2005.

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.

Helman, H; Andery, P.R.P. Análise de falhas (Aplicação dos métodos de FMEA – FTA), Ed. Fundação Cristiano Ottoni, 1985.

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, p 310-317. *Emerging Trends in building Design, Diagnostics, and Operations*. 2003.

Jourdan, G.; troubleshooting the compressor and diagnosing mechanical problems. *Air conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global*, April, Vol. 221, Iss. 14; p. 16 (3 pages).

Leitch, R. D.; *Reliability analysis for engineers: an introduction*. Ed. Oxford University Press, 230 p. New York, 1995.

Lewis, E.E.; *Introduction to reliability engineering*. 2nd ed., Ed. J. Wiley, 435 p. New York, 1996.

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.

Metwalli, S.M.; Salama, M.S.; Taher, R. A.; Computer aided reliability for optimum maintenance planning. *Computers Industry Engineering*, Vol. 35, pp 603 – 606. Elsevier Science Ltd. Great Britain, 1998.

Mirshawka, V.; *Manutenção preditiva: caminho para zero defeitos*. Ed. Makron Books, São Paulo, 1991.

Modarres, M.; *What every engineer should know about reliability and risk analysis*. Ed. M. Dekker, New York, 1993.

Myrefelt, S.; *The reliability and availability of heating ventilation and air conditioning systems*. Fonte: *Energy and Buildings* 36. Stockholm, Sweden, 2004.

Nelson, J.J.; Rhodes, S.; Raze, J.D.; Bradley, M.; Reliability Models for Mechanical Equipment. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, 1988.

Nelson, J.J.; Raze, J.D.; Bowman, J.; Perkins, G.; Reliability Models for Mechanical Equipment. Proceedings annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE. EUA, 1989.

Nelson, Wayne – Accelerated testing: Statistical models, test plans and data analysis. Ed. Wiley, New York 1990.

Nepomuceno, L. X. Manutenção preditiva em instalações industriais, v.1, Ed. Edgard Blucher, 1985.

Nepomuceno, L. X. Técnicas de manutenção preditiva, v.1, Ed. Edgard Blucher, 1989.

Nohle, M.; Handling hermetic compressor burnouts. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, 1999.

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.

O'Connor, P.D.; Practical reliability engineering. 4 ed., 512 p. Ed. Willey, England, 2002.

Palady, P.; FMEA: análise dos modos de falha e efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. Ed. IMAM, São Paulo, 2004.

Pinto, A. K. e Xavier, J. N.; Manutenção: Função estratégica. 2 ed., Ed. Qualitymark, Brasil, 2005.

Prasad, B. G. S.; Effect of liquid on a reciprocating compressor. Fonte: Journal of energy Resources technology, ASME 2002.

Schaub, J.; Oil's singular purpose in refrigerant systems. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, Apr 2, Vol. 212, Iss. 14; p. 22 (1 page).

Silva, A.; Manual: Analise de irregularidades nos compressores alternativos. 49 p. Bitzer Internacional, 2004.

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.

Stoecker, W.F. e Jones, J.W.; Refrigeração e ar condicionado. Ed. McGraw Hill, pg 1 a 3, 1985.

Stoecker, W. F. Refrigeração Industrial, 478 p. Ed. Edgard Blucher, 1994.

Stoecker, W. F.; Jabardo, J. M. S.; Refrigeração industrial, Ed. Edgard Blucher, ed. 2, 2002

Tassou, S. A. e Grace, I. N.; Fault diagnosis and refrigerant leak detection in vapour compression refrigerant systems. International journal of refrigeration, Volume 28, Issue 5, August, ps 680-688, 2004.

Tomezyk, J. (2003A); Your's compressor worst nightmare. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, Feb 3, 2003. Vol. 218, Iss. 5; p. 10 (2 pages).

Tomezyk, J. (2003B); Defrost circuit problems. Ar conditioning, heating e refrigeration news, ABI/INFORM Global, Jan 13, 2003. Vol. 218, Iss. 2; p. 30 (2 pages).

Vania, A.; Pennacchi, P. Experimental and theorical 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.

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.

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.

Yan-Qiao, J.; Shi-Liang, W.; Statical analysis of reliability of container refrigeration units. International journal Refrigeration, Vol. 19, Nº 6, pp 407 – 413. Elsevier Science Ltd. Great Britain, 1996.

7. – Anexo 1. FMEA de compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	- 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). - Efficiente (consumo de energia).	<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.	- 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.	- Remoção do filme de lubrificação das partes móveis do compressor, gerando desgaste progressivo e consequentemente quebra. - Partida inundada, - Golpe de líquido.	Ineficiência progressiva do sistema até a quebra	- Formação de gelo na sucção do compressor, - Vibração e ruído anormais, - Aumento do consumo elétrico, - Ineficiência térmica (sujeito a inércia do sistema), - Parada do sistema.	- 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	- 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,

Figura 58 – 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	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	- 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).	<i>Partida inundada:</i> A migração de fluido refrigerante ocorre normalmente durante as paradas do compressor, resultado da condensação de fluido refrigerante na parte do sistema com temperaturas mais baixas. O fluido refrigerante que circula como vapor é retido em forma de líquido, quando se condensa no local com temperaturas mais baixas (geralmente este local é o compressor). Isto irá continuar até que o sistema entre em equilíbrio em relação a temperatura e pressão do fluido refrigerante. Sendo o compressor construído com uma grande massa de ferro fundido, ele é normalmente o último a esfriar em uma parada e é geralmente o último componente do sistema frigorífico a se aquecer. À medida que a temperatura ambiente se eleva, consequentemente o compressor é o componente com temperatura mais elevada do sistema após várias horas de parada do equipamento. Este fluido condensado que se aloja no compressor tende a se misturar com o óleo lubrificante, que possui grande afinidade pelo mesmo, tendendo a diluí-lo. Isto faz com que o lubrificante perca grande parte de suas propriedades lubrificantes e causando muitos outros problemas.	- Remoção do filme de lubrificação das partes móveis do compressor durante a partida, gerando desgaste progressivo e consequentemente quebra. - Falha dos ventiladores do evaporador e condensador. - Falha do dispositivo de expansão. - Excesso de fluido refrigerante no sistema. - Retorno de refrigerante líquido.	- Desgaste progressivo pela perda da capacidade de lubrificação do óleo. - Espumação; - Golpe de líquido; - Problemas de lubrificação.	Ineficiência progressiva do sistema até a quebra	- Formação de gelo no carter do compressor; - Aumento do consumo elétrico; - Parada do sistema.	- Medição da amperagem consumida pelo compressor; - Verificação do superaquecimento total; - Verificação da temperatura do compressor (interna), dos demais componentes e do ambiente; - Verificar visor de óleo do compressor (espumação) durante a partida.	8	- Recalibração ou substituição do elemento de expansão; - Verificação dos ventiladores; - Instalação de um reservatório de sucção para o compressor; - Recolhimento do fluido refrigerante antes de paradas prolongadas; - Retirada do excesso de refrigerante. - Instalar o compressor em ambientes que não permitam que o mesmo fique mais frio que o evaporador; - Ligar o aquecedor de carter antes de partir o compressor, depois ou durante a carga de gás e não partir o compressor até que o carter esteja aquecido; - Instalar um sistema de "pump down", que consiste em uma válvula solenóide que corta a linha de líquido quando o compressor é desarmado pelo pressostato de baixa pressão.

Figura 59 – FMEA Partida inundada.

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	- 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).	<i>Problemas de lubrificação:</i> A perda de óleo consiste no não retorno do óleo ao cárter do compressor, impedindo assim a correta lubrificação ou o aquecimento suficiente, o que resulta na geração de calor e desgaste. Se um projeto inadequado permitir que grandes quantidades de óleo sejam retidas quando em carga mínima, o óleo poderá voltar como um golpe de líquido quando o compressor voltar a trabalhar com capacidade mais elevada. O excesso de óleo lubrificante tem o mesmo efeito.	- Ciclagem curta. - Longos períodos de funcionamento com carga mínima; - Projeto inadequado da tubulação (linha); - Partida inundada (Espumação); - Superaquecimento excessivo; - Entupimento do filtro de óleo.	- Lubrificação insuficiente dos mancais e dos componentes móveis, como o virabrequim; - Golpe de líquido; - Superaquecimento excessivo.		Ineficiência progressiva do sistema até a quebra	- Aumento do consumo elétrico; - Aumento da temperatura do compressor; - Parada do sistema.	- Medição da amperagem consumida pelo compressor; - Verificação do aumento de temperatura do óleo e de saída do compressor; - Verificação da temperatura do compressor (interna); - Verificação da pressão de óleo.	6	Ações a serem tomadas: - Ajuste do sistema de controle, correção do set-point da temperatura de saída do evaporador; - Verificar filtro de óleo; - Verificar o retorno de óleo com carga parcial; - Verificar o funcionamento do pressostato diferencial de óleo; - Revisar o circuito de comando para evitar ciclos curtos de partida; - Verificar o nível de óleo; - Revisar o desenho das tubulações de sucção (suções, diâmetros, inclinação); - Correção do projeto da tubulação; - Correta aplicação de óleo (seguir recomendação do fabricante).

Figura 60 – FMEA Problemas de lubrificação.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	- 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 mau ambiente). - Seguro (operador). - Eficiente (consumo de energia).	Golpe de líquido : Em compressores alternativos quando um grande volume de líquido (que pode ser fluido refrigerante, óleo lubrificante ou ambos) se encontra dentro do cilindro, o pistão não consegue expeli-lo pela válvula de descarga durante um pequeno período de tempo durante a compressão. Portanto, ele cria uma pressão excessiva no interior do cilindro. Esta pressão hidrostática cria excessivas cargas no pistão, que irá transmiti-la através da biela, virabrequim, etc. até o mancal principal, até que um dos componentes não agüente e falhe. O contínuo retorno de fluido refrigerante no estado líquido causado pelo falta de superaquecimento também causa a refrigeração do bloco do compressor. Quando o sistema é desligado, o fluido refrigerante no estado líquido retido no bloco resfriado do compressor causa um golpe de líquido quando o compressor é ligado novamente. Como muitos sistemas de climatização operam com controle do tipo liga/desliga, o sistema pode ter vários golpes de líquido durante um dia devido ao retorno do fluido refrigerante no estado líquido estar ocorrendo.	- Retorno de fluido refrigerante no estado líquido; - Partida inundada; - Problemas de lubrificação; - Excesso de óleo lubrificante no sistema; - Excesso de fluido refrigerante no sistema.	Quebra mecânica generalizada	- Saída de operação do sistema; - Elevada perda de eficiência	- Parada do sistema; - Ineficiência; - Ruído e vibração; - Vazamento de fluido refrigerante;	- 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); - Verificar visor de óleo do compressor (espumação) durante a partida.	9	- Recalibração ou substituição do elemento de expansão; - Limpeza da evaporadora; - Verificação dos ventiladores do evaporador; - Instalação de um reservatório de sucção para o compressor; - Recolhimento do fluido refrigerante antes de paradas prolongadas; - Retirada do excesso de refrigerante; - Instalar o compressor em ambientes que não permitam que o mesmo fique mais frio que o evaporador; - Ligar o aquecedor de carter antes de partir o compressor, depois ou durante a carga de gás e não partir o compressor até que o carter esteja aquecido; - Instalar um sistema de pump down, uma válvula solenóide que corta a linha de líquido quando o compressor é desarmado pelo pressostato de baixa pressão; - Ajuste do sistema de controle, correção do set-point; - Verificar o retorno de óleo com carga parcial; - Verificar o funcionamento do pressostato diferencial de óleo; - Revisar o circuito de comando para evitar ciclos curtos de partida; - Verificar o nível de óleo; - Revisar o desenho das tubulações de sucção (ninhos, diâmetros, inclinação); - Correção do projeto da tubulação; - Correta aplicação de óleo (seguir recomendação do fabricante)

Figura 61 – FMEA Golpe de líquido.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	- 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 mau ambiente). - Seguro (operador). - Eficiente (consumo de energia).	Superaquecimento excessivo : É gerado diante de uma elevada temperatura na descarga do compressor. Ocorre principalmente quando se trabalha com um valor elevado do superaquecimento do vapor de fluido refrigerante na sucção deste equipamento. As temperaturas de descarga elevadas afetam a viscosidade do óleo e inclusive podem carbonizá-lo. A diminuição na viscosidade do óleo ocasionará uma diminuição da resistência da película lubrificante, a qual pode chegar a romper-se e permitir o contato de metal contra metal, com o consequente desgaste.	- Alta razão de compressão; - Baixa carga de refrigerante; - Controle de capacidade do motor abaixo do seu limite de projeto; - Restrição da linha de refrigerante; - Contaminação por unidade, obstrução da linha; - Falha dos ventiladores do condensador; - Falhas do condensador; - Válvula de expansão subdimensionada; - Problemas de lubrificação.	- Perda da viscosidade do óleo, que gera desgaste, aderência de componentes e carbonização do óleo; - Quebra de válvulas por mudanças de propriedades devido ao calor; - Desgaste do pistão por expansão térmica; - Superaquecimento do compressor; - Queima do motor elétrico; - Superaquecimento excessivo.	Ineficiência progressiva do sistema até a quebra;	- Aumento da temperatura do compressor; - Aumento do consumo elétrico; - Ineficiência térmica; - Ruído anormal do compressor; - Parada do sistema.	- Medição da amperagem consumida pelo compressor; - Verificação do aumento de temperatura do na saída do compressor; - Verificação da temperatura de entrada e saída de ar no evaporador; - Verificação do superaquecimento total; - Verificação dos ventiladores do condensador; - Verificação do visor de líquido.	6	- Ajuste do sistema de controle, correção do set-point de temperatura do evaporador; - Eliminação de vazamentos; - Carga de refrigerante; - Substituição do filtro secador; - Limpeza do filtro de sucção; - Limpeza do condensador e verificação dos ventiladores; - Ajuste ou substituição da válvula de expansão; - Isolar corretamente a linha de sucção, fundamentalmente se esta passar por locais quentes (a elevação da temperatura do refrigerante de sucção acarretará um aumento da temperatura de descarga); - Verificar se a taxa de compressão não está fora da faixa de aplicação do compressor (pressões de descarga muito altas, pressões de sucção muito baixas ou ambas); - Verificar se o resfriamento do compressor é o requerido pelo fabricante (ventilador de adicional de cabeçote mensente ou queimado, compressor instalado em salas de máquinas sem ventilação, etc.); - Revisar a condensação (condensadores sujos, ventiladores queimados, trocadores de calor micustados, etc.); - Instalação de um sistema de "by pass" ligando a linha de líquido com a sucção do compressor, controlada por uma válvula de ação térmica.

Figura 62 – FMEA Superaquecimento excessivo.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	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).	<i>Contaminação por umidade</i> : Práticas inadequadas quando realizadas durante a instalação e manutenção (falta de cuidado, defeito de acabamento, falta de equipamentos e insumos), permitem a entrada de ar úmido na linha de fluido refrigerante. Esta umidade ataca a linha, componentes (corrosão), o fluido refrigerante e ainda pode acarretar a formação de gelo que pode causar restrições de vazão do fluido refrigerante.	- Ar introduzido no sistema durante a instalação ou manutenção da tubulação; - Manuseio incorreto dos óleos lubrificantes do compressor.	- Oxidação, corrosão, decomposição do refrigerante; - Calor excessivo devido a fricção; - Degaste das superfícies de contato; - Superaquecimento excessivo.	Ineficiência progressiva do sistema até a quebra.	- Aumento da temperatura do compressor; - Aumento do consumo elétrico; - Ineficiência térmica; - Parada do sistema.	- Medição da amperagem consumida pelo compressor; - Verificação da pressão de óleo; - Verificação da temperatura do óleo; - Inspeção dos filtros secadores; - Exame do óleo; - Inspeção do indicador de umidade.	6	- Purga da linha de refrigerante com gás inerte; - Substituição do filtro secador; - Limpeza do filtro de sucção; - Substituição do fluido lubrificante; - Substituição do fluido refrigerante.

Figura 63 – FMEA Contaminação por umidade.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	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).	<i>Contaminação por impurezas do ar</i> : Materiais estranhos, tais como sujeira, fluxo de solda, ou produtos químicos juntamente com o ar, resultam em desequilíbrios químicos que provocam ruptura das moléculas de óleo. Esta condição aliada ao calor oriundo das altas temperaturas de descarga do sistema e das temperaturas devido ao aumento da fricção, pode resultar na formação de ácidos, incrustação ou ambos.	- Ar com impurezas introduzido no sistema durante a instalação ou manutenção da tubulação aliado a altas temperaturas; - Manuseio incorreto dos óleos lubrificantes aliado a altas temperaturas.	- Formação de ácidos e incrustação (lodo) que aumentam a fricção e geram desgaste; - Copperplating.	Ineficiência progressiva do sistema até a quebra.	- Aumento da temperatura do compressor; - Aumento do consumo elétrico; - Ineficiência térmica; - Parada do sistema.	- Medição da amperagem consumida pelo compressor; - Verificação da pressão de óleo; - Verificação da temperatura do óleo; - Inspeção dos filtros secadores de sucção;	6	- Purga da linha de refrigerante com gás inerte; - Limpeza do filtro de sucção; - Limpeza dos componentes; - Substituição do fluido lubrificante; - Substituição do fluido refrigerante.

Figura 64 – FMEA Contaminação por impurezas do ar.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	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).	<i>Contaminação por óxidos</i> . A formação de óxidos ocorre quando o calor aplicado pelo mançanico é realizado na presença de ar. Estes óxidos se acumulam no filtro de óleo acarretando em uma perda de óleo.	• Ocorre quando o calor aplicado pelo mançanico, é aplicado na presença do ar.	• Perda de lubrificação	• Ineficiência progressiva do sistema até a quebra.	• Aumento do consumo elétrico; • Parada do sistema.	• Medição da amperagem consumida pelo compressor; • Verificação do aumento de temperatura do óleo e de saída compressor; • Verificação da temperatura do compressor (interna). • Verificação do visor de óleo; • Verificação da pressão de óleo; • Verificar filtro de óleo.	6	• Limpeza ou substituição do filtro de óleo; • Limpeza dos componentes; • Substituição do óleo.

Figura 65 – FMEA Contaminação por óxidos.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	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).	<i>Cooperplating</i> : O cobreamento surge em duas fases. Primeiramente, o cobre é dissolvido nos subprodutos de uma reação entre óleo e o fluido refrigerante. A quantidade de cobre dissolvido é determinada pela natureza do óleo, pela temperatura e pela presença de impurezas. Na segunda fase, o cobre dissolvido é depositado nas partes metálicas numa reação eletroquímica.	• Temperatura de descarga de refrigerante muito elevada e presença de impurezas.	• Cobreamento de superfícies de peças que funcionam a altas temperaturas, resultando em desgaste e emperramento.	• Ineficiência progressiva do sistema.	• Aumento do consumo elétrico; • Aumento da temperatura do compressor.	• Medição da amperagem consumida pelo compressor; • Verificação do aumento de temperatura do óleo; • Verificação da temperatura do compressor (interna).	5	• Corrigir problemas de superaquecimento excessivo; • Corrigir problemas de contaminação por umidade; • Corrigir problemas de contaminação por impurezas.

Figura 66 – FMEA Cooperplating.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	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).	<i>Sobrecarga do motor elétrico</i> : Há maior probabilidade de ocorrer uma sobrecarga resultando na queima completa do motor elétrico quando o motor está na posição parada. No momento que o motor é energizado, as solicitações elétricas e mecânicas sobre os enrolamentos são as mais fortes. Se nesta ocasião, a tensão for baixa ou o compressor estiver mecanicamente travado, o motor se queimará se os componentes de proteção não forem acionados a tempo.	• Temperatura de descarga de refrigerante muito elevada; • Falta de fase, a falta de corrente numa das fases de um motor elétrico trifásico; • Sub e sobre tensão; • Travamento por falha mecânica; • Ciclagem curta.	• Queima do motor elétrico do compressor.	• Parada do compressor.	• Parada do sistema.	• Medição da amperagem consumida pelo compressor; • Medição das fases da rede de distribuição elétrica ; • Medição do número de partidas por hora e comparação com o recomendado pelo fabricante.	10	• Instalar equipamentos de proteção elétricos; • Ajuste do sistema de controle, correção do set-point de temperatura do compressor; • Limpeza dos contatos elétricos.

Figura 67 – FMEA Sobrecarga do motor elétrico.

Identificação	Descrição do equipamento	Função	Possíveis modos de falha	Possíveis causas	Possíveis efeitos			Formas de detecção	Severidade	Ações a serem tomadas
					Local	Próximo nível	Final			
Comp 1	Compressor semi-hermético alternativo de fluido refrigerante	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).	<i>Rompimento do enrolamento do motor elétrico</i> : Fragmentos de metal resultantes de falhas mecânicas podem ficar alojados nos enrolamentos do motor. Estes fragmentos podem funcionar como ferramentas de corte, causando danos aos isolamentos do mesmo. Este modo de falha pode surgir meses após a ocorrência da falha mecânica que originou o fragmento. Outra forma de danificar de forma pontual o enrolamento do motor é com a sobre correção do fator de potência (correção feita com o uso de capacitores no quadro elétrico, pois estes equipamentos trabalham com sobra de potência do motor elétrico de projeto) que irá ocasionar um pico de tensão.	• Fragmento de palheta do conjunto de placa de válvula aspirado pela sucção do compressor; • Ruptura do isolamento; • Pico de tensão.	• Queima do motor elétrico.	• Queima do motor elétrico do compressor.	• Parada do compressor.	• Verificação da correção do fator de potência; • Medição da voltagem da rede de distribuição elétrica.	10	• Instalar equipamentos de proteção elétricos; • Adequar o fator de potência para o nível previsto pelo fabricante; • Correta limpeza do compressor após a quebra de componentes.

Figura 68 – FMEA Rompimento do enrolamento do motor elétrico.

8. – *Apêndice 1. Critérios para elaboração do FMEA*

Alguns critérios foram adotados para elaboração do FMEA para compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração.

Um problema citado em todos os trabalhos pesquisados (capítulo 2) onde se parte de um banco de dados de campo e não de laboratório, onde as condições são diversas, os usos e modos de operação são diferentes bem como a especialização da mão de obra de operação e manutenção. São os critérios adotados para se definir e distinguir os diferentes modos de falhas dos equipamentos.

Os modos de falha encontrados em compressores alternativos de sistemas de refrigeração são diversos e podem ocorrer ao mesmo tempo, ou mesmo podem ter origem em outros modos de falha, sendo a dificuldade definir qual o modo de falha inicial ou que levou a falha encontrada.

A análise realizada parte apenas da interpretação das condições do compressor não se possuindo na maior parte dos casos informações sobre as condições do sistema onde o mesmo estava instalado, que como pode ser visto no FMEA proposto, tem grande influência sobre a interpretação do modo de falha.

O banco de dados utilizado neste trabalho foi cedido por uma firma do setor de manutenção, no entanto para a definição dos modos de falhas a informação pode ser considerada apenas provável devido aos fatos citados acima ou outros que serão discutidos.

Um ponto a ser citado é o fato de apenas equipamentos de maior custo de manutenção ser analisados, pois pequenos reparos são realizados pelo próprio pessoal de manutenção do cliente e equipamentos de menor custo são apenas descartados, no caso de erros de operação e manutenção os clientes podem omitir parte da informação sobre a origem das falhas.

Outra dificuldade encontrada foram as características dos relatórios cedidos para a análise, que eram compostos dos componentes danificados, possíveis causas (sendo estas definidas conforme um manual de análise da firma, por comparação das partes danificadas com fotos armazenadas) e fotos parciais dos componentes danificados. Diversos relatórios apresentaram informação insuficiente para a definição do modo de falha ou mesmo dados visivelmente equivocados.

Algumas interpretações foram necessárias para se distinguir os modos de falha dos compressores, as principais foram:

A comparação entre desgaste causado por problemas de lubrificação e retorno de fluido refrigerante líquido foi feita pelo fato dos componentes atingidos por problemas de lubrificação usualmente apresentam sinais de temperatura, como coloração característica, sendo que quando ocorrem problemas de lubrificação usualmente são notados riscos enquanto no outro caso se apresenta um desgaste irregular principalmente se for o mancal do motor (por onde o fluido primeiro circula pra refrigerá-lo).

Outro fator a ser considerado no caso de problemas de lubrificação é que o desgaste dos anéis do pistão pode permitir a pressurização do Carter do compressor impedindo a correta circulação de óleo.

O golpe de líquido causado por problemas de lubrificação ou retorno de fluido refrigerante líquido, foi diferenciado pelo fato do pistão danificado por problemas de lubrificação apresentar riscos ou sinais de temperatura (coloração) enquanto no outro caso apresenta um desgaste irregular.

Superaquecimento excessivo e problemas de lubrificação, que podem um originar o outro, pelo fato do óleo não retornar ao compressor em situações onde a velocidade do fluido refrigerante é insuficiente para permitir o arraste deste óleo e que a falta de lubrificante gera atrito que por sua vez gera calor podem do causar o aquecimento do fluido refrigerante, foi considerado, quando efeitos como carbonização do óleo nos pistões e válvulas não eram visíveis (superaquecimento excessivo), quando pistões e válvulas estão danificados superaquecimento excessivo e mancais, virabrequim e bielas desgastados problemas de lubrificação.

Problemas de lubrificação podem se originar da partida inundada no caso que o lubrificante dissolvido pelo refrigerante durante a partida do compressor, espuma e é transferido para o sistema causando perda de lubrificante no carter do compressor até que este retorne depois de percorrer todo o sistema.

9. – Apêndice 2. Extrapolação do FMEA

Como já discutido no item 1.1.3 – Compressores de fluido refrigerante, os compressores alternativos apresentam três construções distintas, os compressores abertos, semi-herméticos e herméticos.

A construção do FMEA foi realizada inicialmente para abordar apenas os compressores semi-herméticos, mas dadas às similaridades entre estas máquinas podemos expandir o FMEA para as demais observando as diferenças entre elas.

Compressores abertos geralmente trabalham em menores rotações com o auxiliado de transmissões e reduções mecânicas o que em tese diminui sua eficiência, todavia pelo fato de não aquecer o fluido refrigerante com o contato direto do enrolamento do motor elétrico isto não necessariamente o torna menos atrativo sendo que para alguns fluidos refrigerantes este compressor é o único que pode ser utilizado, como a amônia.

Outro fato interessante sobre estas máquinas é o fato de necessitarem do uso de selos mecânicos ou vedações entre a carcaça e o motor elétrico.

Com isso pode-se notar que os compressores abertos se distinguem em alguns pontos dos semi-herméticos, pois modos de falha como superaquecimento excessivo ou contaminação não conseguem gerar uma queima completa do enrolamento do motor, mas nos outros casos como carbonização do óleo, fragilização de componentes e diluição do óleo afetam da mesma maneira o compressor.

Já os compressores herméticos que são totalmente selados, são pouco afetados por falhas como queimas localizadas causadas por fraguimentos metálicos, dado o fato que estes compressores não podem sofrer manutenção.

Eles podem apresentar mais facilmente problemas ligados ao refrigerante e sensibilidade à falta de óleo, pois trabalham imersos nestes fluidos.

Dadas estas características o mesmo trabalho pode ser facilmente convertido ou ampliado, como já comentado, para estas máquinas.

10. – Apêndice 3. Ocorrência individual dos modos de falha dos compressores em estudo

Tabela 12 – Ocorrência dos modos de falha dos compressores estudados.

Modelos	Modos de falha	Participação individual
A	Defeito de fabricação	33.3%
	Retorno de fluido refrigerante no estado líquido	33.3%
	Problemas de lubrificação	22.2%
	Golpe de líquido	11.1%
B	Superaquecimento excessivo	33.3%
	Golpe de líquido	25.0%
	Defeito de fabricação	16.7%
	Partida inundada	16.7%
	Outros	8.3%
C	Elétrico	20.0%
	Golpe de líquido	20.0%
	Retorno de fluido refrigerante no estado líquido	20.0%
	Superaquecimento excessivo	20.0%
	Contaminação	10.0%
	Problemas de lubrificação	10.0%
D	Golpe de líquido	50.0%
	Elétrico	37.5%
	Contaminação	12.5%
E	Contaminação	42.9%
	Defeito de fabricação	28.6%
	Elétrico	14.3%
	Problemas de lubrificação	14.3%
F	Elétrico	33.3%
	Contaminação	16.7%
	Golpe de líquido	16.7%
	Retorno de fluido refrigerante no estado líquido	16.7%
	Superaquecimento excessivo	16.7%
G	Golpe de líquido	31.3%
	Elétrico	25.0%
	Retorno de fluido refrigerante no estado líquido	18.8%
	Superaquecimento excessivo	12.5%
	Defeito de fabricação	6.3%
	Partida inundada	6.3%