

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CRISTIANO STEFANO DA SILVA

**PRESCRIÇÃO DA MODALIDADE DE MANUTENÇÃO DE MOTORES
ELÉTRICOS CONSIDERANDO O CUSTO DE MANUTENÇÃO E
DEPRECIÇÃO DO ATIVO**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2012

CRISTIANO STEFANO DA SILVA

**PRESCRIÇÃO DA MODALIDADE DE MANUTENÇÃO DE MOTORES
ELÉTRICOS CONSIDERANDO O CUSTO DE MANUTENÇÃO E
DEPRECIÇÃO DO ATIVO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

PONTA GROSSA

2012

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.40/12

S586 Silva, Cristiano Stefano da

Prescrição da modalidade de manutenção de motores elétricos considerando o custo de manutenção e depreciação do ativo. -- Ponta Grossa, 2012.

83 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2012.

1. Motores elétricos. 2. Manutenção - Estratégias. 3. Equipamentos - Vida útil. 4. Weibull, Análise. I. Behainne, Jhon Jairo Ramirez. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. III. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 206/2012

**PRESCRIÇÃO DA MODALIDADE DE MANUTENÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS
CONSIDERANDO O CUSTO DE MANUTENÇÃO E DEPRECIÇÃO DO ATIVO.**

por

CRISTIANO STEFANO DA SILVA

Esta dissertação foi apresentada **às 13:30** horas de **23 Julho de 2012** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, linha de pesquisa em **Gestão da Produção e Manutenção**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Rui Francisco Martins Marçal:
PUCPR

Prof. Dr. Ariel Orlei Michaloski
(UTFPR)

Prof. Dr. Flávio Trojan
(UTFPR)

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
(UTFPR) *Orientador*

Prof. Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)
Coordenador do PPGEP

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR –CÂMPUS PONTA GROSSA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a “Deus Pai” pela vida e sabedoria e toda força e coragem para enfrentar os obstáculos e desafios, e pelas bençãos que tem me proporcionado na minha vida.

Agradeço por minha Esposa e Filha, que tem me apoiado e me auxiliado em todos os momentos de minha vida acadêmica e profissional, proporcionando-me compressão tempo e incentivo para evoluir nesta trajetória.

Ao professor John J. Ramirez Behainne pela orientação, pelo apoio, ensinamentos e ajuda para todo o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Ao professor Rui Francisco Marçal pela ajuda e incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa.

O Senhor é meu Pastor e nada me faltará.

[...] E ainda que eu ande pelo vale da
sombra da morte, não temerei mal algum,
porque Tú estarás comigo;

[...] Bondade e o amor certamente me
acompanharão todos os dias de minha
vida e habitarei na casa do

Senhor por longos dias.

(Salmo 23; versículos: 1,4 e 6).

RESUMO

SILVA, Stefano Cristiano. **Prescrição da modalidade de manutenção de motores elétricos considerando o custo da manutenção e a depreciação do ativo**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnologia Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2012.

Uma adequada gestão das atividades de manutenção foca seus objetivos na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, bem como na diminuição dos custos de reparo envolvidos. Visando contribuir neste sentido, o presente trabalho propõe um estudo de caso relacionado à análise de depreciação técnica e depreciação econômica dos equipamentos utilizados numa indústria de produção de papel imprensa. Especificamente, aplica-se a análise da curva de Weibull a uma base de dados de histórico de falhas ocorridas em motores elétricos existentes no processo produtivo e realiza-se, simultaneamente, uma análise de depreciação econômica desses equipamentos. O estudo envolveu a análise de 31 motores elétricos, classificados em 10 grupos de acordo com a potência de operação. A partir dos resultados obtidos para o coeficiente de forma correspondente a um período histórico de 20 anos de manutenção, bem como da análise de depreciação dos motores, foi possível verificar que mais de 50% dos motores analisados tiveram falhas do tipo mortalidade prematura e, o restante dos equipamentos, falhas do tipo fim de vida útil. Uma análise estatística de importância da correlação entre as variáveis de estudo indicou que, para o nível de confiança de 95%, a potência do motor elétrico não apresenta correlação significativa com o valor do fator de forma e nem com o número de manutenções corretivas realizadas. A única relação significativa foi encontrada entre o tamanho do motor e o custo das manutenções ou intervenções, como era esperado. O estudo realizado mostrou de uma maneira ágil e do ponto de vista da gestão da manutenção, uma análise técnica e econômica conjunta da vida útil de motores elétricos em relação à questão da sua depreciação e à escolha da melhor estratégia de manutenção a ser adotada.

Palavras-chave: Motores Elétricos. Estratégia de Manutenção. Vida útil de Equipamentos. Análise de Weibull

ABSTRACT

SILVA, Stefano Cristiano. **Prescription the modality of maintenance of electric motors considering the cost of maintenance and asset depreciation**. 2012. 83 p. Dissertation (Master in Production Engineering) – Master's Degree in Production Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2012.

An efficient management of maintenance activities is normally focused on reliability and availability of equipments, as well as in reducing the costs involved. Aiming to contribute in this sense, the present study proposes a case of study related to the analysis of technical and economic depreciation of electrical motors used in processes of a newsprint industry. In particular, both the Weibull distribution and an economic depreciation analysis were applied to a historic data base containing electric motor failures. The study was carried out for 31 electric motors, which were classified into 10 groups of electric powers. From results obtained for the form factor in 20 years of maintenance and the depreciation analysis was verified that more than 50% of electric motors had premature failures, whereas the rest of equipments had failures of useful life. A statistical analysis of correlation among variables showed that the power of the electric motor had no significance correlation with both the form factor and the number of failure events at 95% of confidence level. However, a significance correlation was found between the power of the electric motor and the maintenance cost involved, as expected. The study showed a practical way of a combined technical and economical analysis applied to electric motors for choosing the better maintenance strategy.

Keywords: Electric Motors. Maintenance strategy. Useful life of equipments. Weibull analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Causa de falhas em motores elétricos	13
Figura 2 - Idade média dos equipamentos e instalações nas empresas brasileiras..	23
Figura 3 - Probabilidade de falha durante a vida útil do equipamento - Curva da Banheira	25
Figura 4 - Estratégia de manutenção e o comportamento do equipamento em função da forma de distribuição de Weibull na Curva da Banheira.....	28
Figura 5 - Custo da manutenção em relação ao faturamento das empresas	29
Figura 6 - Motor de indução trifásico	31
Figura 7 – Estator conectado Ligação Estrela - Possíveis Modos de Falhas	33
Figura 8 - Falha do Tipos: Curto Entre Espiras e Bobina Curto-Circuitada.....	34
Figura 9 - Tipo de falha curto-circuito entre fases	34
Figura 10 - Fluxograma: procedimento metodológico	35
Figura 11 - Dados coletados / históricos de falhas motores desde o ano de 1991 até 2010	36
Figura 12 - Motores selecionados que tiveram falhas no bobinado estatórico	37
Figura 13 - Dados dos motores selecionados que tiveram mais de duas falhas durante o período analisado, desde 1991 até 2010	38
Figura 14 - Papel de probabilidade de Weibull para dados de falhas ocorridas no bobinado do motor elétrico	40
Figura 15 - Exemplo de Weibull papel de probabilidade de plotagem.....	42
Figura 16 - Gráfico de probabilidade de dados do Exemplo 1	44
Figura 17 - Papel de probabilidade de Weibull para dados de falhas ocorridas no bobinado do motor elétrico nº 971.....	48
Figura 18 - Papel de probabilidade de Weibull para dados de falhas ocorridas no bobinado do motor elétrico nº 969.....	51
Figura 19 - % de motores em relação ao critério de manutenção adotado para os 31 motores analisados no estudo.....	56
Figura 24 - Grupo de motores C - Análise da distribuição de Weibull	64
Figura 25 - Grupo de motores D - Análise da distribuição de Weibull	66
Figura 26 - Grupo de motores E - Análise da distribuição de Weibull	67
Figura 27 - Grupo de motores F - Análise da distribuição de Weibull x Análise Combinada	69
Figura 28 - Grupo de motores G - Análise da distribuição de Weibull.....	70
Figura 29 - Grupo de motores H - Análise da distribuição de Weibull.....	72
Figura 30 - Grupo de motores I - Análise da distribuição de Weibull.....	73
Figura 31 - Grupo de motores J - Análise da distribuição de Weibull.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Método linear - Exemplo de depreciação de ativo no valor de R\$ 25.000,00.	22
Quadro 2 - Bens relacionados na pela IN SRF n° 130/99 – Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM).....	22
Quadro 3 - Total de 31 motores selecionados que tiveram mais de 2 falhas (queima do bobinado), no período de análise de falhas desde o ano de 1999 até 2010	39
Quadro 4 - Cálculo do valor de beta através do uso do software Excell	41
Quadro 5 - Análise de depreciação contábil de motor selecionado para o estudo....	46
Quadro 6 - Informação custo do ativo novo e custo para executar manutenção corretiva (rebobinar o estator do motor)	46
Quadro 7 - Cálculo do valor de beta através do uso do software Excell	48
Quadro 8 - Análise combinada dos históricos de manutenção do motor de n° 971 ..	49
Quadro 9 - Análise do valor de beta utilizando a planilha de cálculo do Excel.....	50
Quadro 10 - Resultados da análise combinada do motor com código 969	51
Quadro 11 - Grupo de variáveis para análise de correlação estatística	53
Quadro 12 – Resultado das correlações entre as variáveis, usando o software Excel	53
Quadro 13 - Resultados da análise combinada para os 31 motores objeto de estudo	56
Quadro 14 - Resultados da análise da distribuição de Weibull para os 31 motores objeto de estudo.....	58
Quadro 15 - Grupo de motores em relação a análise da distribuição de Weibull para os 31 motores objeto de estudo	60
Quadro 16 - Grupo de motores A - Análise da distribuição de Weibull x Análise combinada.....	61
Quadro 17 - Grupo de motores B - Análise da distribuição de Weibull	62
Quadro 18 - Grupo de Motores C - Análise da distribuição de Weibull	64
Quadro 19 - Grupo de motores D - Análise da distribuição de Weibull	65
Quadro 20 - Grupo de motores E - Análise da distribuição de Weibull	67
Quadro 21 - Grupo de motores F - Análise da distribuição de Weibull.....	68
Quadro 22 - Grupo de motores G - Análise da distribuição de Weibull	70
Quadro 23 - Grupo de motores H - Análise da distribuição de Weibull	71
Quadro 24 - Grupo de Motores I - Análise da distribuição de Weibull.....	73
Quadro 25 - Grupo de motores J - Análise da distribuição de Weibull	74
Quadro 26 – Coeficiente de correlação entre variáveis calculado no software Excel	76

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> - Associação Americana para Testes e Materiais.
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
SAP/R3	<i>System, Applications and Products</i> - Sistemas, Aplicações e Produtos
TMEF	Tempo médio entre falhas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 HIPÓTESE.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	15
1.3.1 Objetivo Geral.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.4 CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA EXPLORATÓRIA.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 A MANUTENÇÃO E A SUA EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	17
2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO.....	19
2.2.1 Manutenção com Foco na Produção	20
2.2.2 Manutenção Corretiva do Tipo Quebra-Conserta.....	21
2.2.3 Manutenção Corretiva do Tipo Substituição.....	21
2.3 DEPRECIAÇÃO ECONÔMICA DE EQUIPAMENTOS	21
2.4 CONFIABILIDADE	23
2.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL: A PROBABILIDADE DE FALHA	27
2.6 CUSTOS DE MANUTENÇÃO.....	28
2.7 MOTOR ELÉTRICO.....	30
2.8 DEFEITOS NO ESTATOR DE MOTORES ELÉTRICOS.....	32
2.8.1 Falha Curto entre Espiras ou Bobinas Curto-Circuitada	33
2.8.2 Curto-Circuito entre Fases	34
3 DESENVOLVIMENTO.....	35
3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	35
3.1.1 Análise de Depreciação Técnica.....	36
3.1.1.1 Descrição da amostra dos equipamentos analisados	36
3.1.1.2 Histórico de falhas dos motores	37
3.1.1.3 Análise da probabilidade de falhas (Curva de Weibull).....	39
3.1.2 Análise da Depreciação Econômica	44
3.1.3 Análise Combinada Relacionada à Estratégia de Manutenção	46
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL EM RELAÇÃO À ANÁLISE COMBINADA	55
4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS POR GRUPO DE MOTORES.....	59
4.2.1 Análise de Resultados para o Grupo de Motores A.....	60
4.2.2 Análise de Resultados para o Grupo de Motores B	62
4.2.3 Análise de Resultados Grupo de Motores C.....	63
4.2.4 Análise de Resultados para o Grupo de Motores D.....	65
4.2.5 Análise de Resultados para o Grupo de Motores E	66
4.2.6 Análise de Resultados para o Grupo de Motores F	68
4.2.7 Análise de Resultados para o Grupo de Motores G.....	69
4.2.8 Análise de Resultados para o Grupo de Motores H.....	71

4.2.9 Análise de Resultados Grupo de Motores I	72
4.2.10 Análise de Resultados para o Grupo de Motores J	74
4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DOS GRUPOS	75
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS.....	79
APÊNDICE A - Tabela 1.....	81

1 INTRODUÇÃO

As indústrias têm constantemente investido recursos e esforços para se manter no mercado, diminuindo os riscos ao negócio ou atividade através da administração de altos níveis de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, da eficiência das linhas de produção e da qualidade de seus produtos. Nestes aspectos, o setor de manutenção das empresas, mediante suas estratégias de gestão, tem desempenhado um papel decisivo, garantindo a estabilidade de todo o sistema produtivo. Assim, as manutenções do tipo preventiva e preditiva são aplicadas visando manter a eficiência dos processos de produção, com os equipamentos mantidos em operação por longos períodos e com a presença mínima de falhas.

No parque fabril de qualquer processo de produção sempre existem equipamentos que estão em fase contínua de depreciação e, até mesmo, a caminho de se tornarem obsoletos. Dessa maneira, a manutenção deverá executar seu papel em relação à aplicação de estratégias apropriadas para cada uma das fases do ciclo de vida do maquinário, a fim de garantir que este realize suas atividades com alta confiabilidade durante todo o processo depreciativo.

A análise de depreciação de um equipamento é uma questão que deve ser avaliada nos aspectos técnicos e econômicos, envolvendo assim, custos de manutenção, condição de disponibilidade e obsolescência. Do ponto de vista contábil, a depreciação demarca a vida econômica do equipamento, pois todos os ativos de uma empresa possuem uma depreciação contábil de seu valor de compra. O valor final da depreciação contábil de um equipamento é zero, a cada ano contábil o equipamento é depreciado com uma taxa percentual sobre o seu valor de imobilizado, ou seja, sobre o valor que o equipamento foi adquirido.

Por outro lado, do ponto de vista técnico, um equipamento sofre depreciação quando sua confiabilidade é baixa, com seu tempo médio entre falhas (TMEF) sendo reduzido.

A definição da melhor estratégia de manutenção vai ao encontro de garantir a melhor *performance* dos equipamentos, melhor confiabilidade do sistema e análise de custos em relação à manutenção.

A estratégia de manutenção de motores elétricos nas indústrias brasileiras tem sido focada amplamente na recuperação do motor danificado, no caso, da

queima do bobinado estatórico. A análise da melhor estratégia em relação à recuperação ou compra de motores novos é uma questão que ainda não é colocada em prática pelos gestores de manutenção. No caso de um motor elétrico existe ainda outro ponto a ser considerado, que é a confiabilidade e a eficiência do equipamento após sua recuperação, sem discorrer na questão de eficiência energética, onde o consumo de energia elétrica normalmente representa o maior custo operacional num processo produtivo. Segundo Eletrobrás (2009 apud LIRA, et al. 2009), motores elétricos são responsáveis por um total de 55% de toda a energia consumida pela indústria brasileira.

A Figura 1, apresentada pelo *Electrical Apparatus Service Association* (EASA, 2003), mostra uma estatística de falhas em motores elétricos. Nessa estatística, 16% dos casos correspondem a falhas no bobinado do estator, sendo também indicado que outras falhas estão relacionadas aos rolamentos, a causas externas e a causas desconhecidas, dentre outras. Este estudo também sugere que uma boa prática de manutenção preditiva poderia reduzir para 75% as falhas ocorridas nos motores.

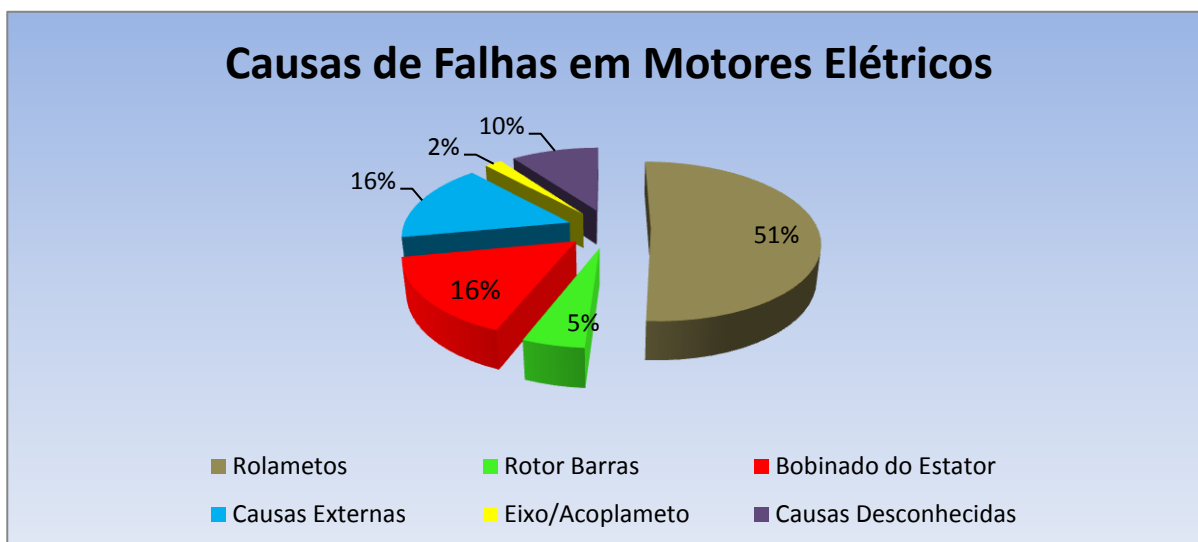


Figura 1 - Causa de falhas em motores elétricos
Fonte: EASA (2003)

A decisão de reparar ou recuperar um motor elétrico no caso de uma falha de seu bobinado estatórico não é uma tarefa simples, pois envolve várias análises em relação à aplicação deste motor dentro do processo fabril, o custo da manutenção corretiva, o custo de um equipamento novo e a política de cada empresa em relação à depreciação de seus equipamentos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O processo fabril das empresas conta com um grande número de equipamentos, exigindo que as estratégias de manutenção estejam alinhadas e que a manutenção seja operacionalizada, garantindo a prioridade no tratamento de equipamentos de maior importância ou daqueles que contribuam para a eficiência e confiabilidade do sistema através dos recursos disponíveis.

Na atual circunstância, percebe-se a necessidade de inovar em meios que garantam a boa prática da manutenção, com aspectos relacionados à eficiência e confiabilidade das instalações, frequência das falhas, custos de manutenção e número de intervenções nos equipamentos.

A depreciação de equipamentos tem impactado constantemente na disponibilidade e confiabilidade de sistemas de produção industrial. Muitos equipamentos são submetidos à manutenção sem uma avaliação do tempo de vida útil dos mesmos e sem determinar quais os retornos da intervenção executada. Assim, alguns equipamentos, ao sofrerem uma manutenção, acabam perdendo sua eficiência, impactando diretamente no aumento do consumo de energia ou de outros recursos, para que o mesmo trabalhe nas características iniciais de projeto e nas demandas requeridas da produção.

Uma pesquisa apresentada pela Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN, 2011), mostra que o investimento destinado na manutenção das fábricas é alto. Em 2011, os custos de manutenção representaram, em média, 3,95% do faturamento bruto das empresas. No ano de 2009, a média dos custos de manutenção em relação ao faturamento bruto foi de 4,14%, sendo que apesar de todos os esforços e das estratégias de manutenção realizadas, a indisponibilidade operacional em função da manutenção cresceu de 4,74% em 1997 para 5,44% em 2011. Os dados mostram que as empresas têm investido mais em manutenção, com a disponibilidade operacional tendo aumentado de 90,27% em 2009 para 91,30% em 2011.

Outro fator que deve ser levado em consideração são os custos de manutenção, bem como a vida útil dos equipamentos utilizados pelas empresas. Atualmente, o parque fabril da indústria brasileira, segundo (ABRAMAN, 2011), apresenta um percentual de faixa de idade média dos equipamentos/instalações de 15,94 anos.

Com esse panorama apresentado, evidencia-se a necessidade de criar meios e ferramentas que auxiliem no processo de tomada de decisão na gestão da manutenção, indicando métodos adequados para a análise de depreciação dos equipamentos inseridos no setor produtivo. Neste contexto, o presente trabalho procurará responder à seguinte questão: **Como analisar a depreciação de equipamentos, motores elétricos, considerando os aspectos técnicos e econômicos que garantam um melhor desempenho na estratégia de manutenção?**

1.2 HIPÓTESE

A proposta de uma análise conjunta de depreciação técnica e econômica poderá ajudar na definição da melhor estratégia de manutenção a ser adotada nas diferentes fases da vida de motores elétricos.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal e os objetivos específicos desta Pesquisa de Mestrado são descritos a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um procedimento para a análise de depreciação técnica e econômica de motores elétricos utilizados em uma indústria de papel imprensa com o objetivo de prescrever a melhor estratégia de manutenção nas fases que compreende a vida útil do equipamento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Constituem os objetivos específicos desta Dissertação:

- Realizar o levantamento da distribuição de falhas ocorridas em motores elétricos com potência de até 186 kW na empresa objeto de estudo, históricos de falhas do ano de 1991 até o ano de 2010;

- Aplicar a curva de Weibull para a análise técnica do estado dos equipamentos, visando a determinação do estado de depreciação dos mesmos;
- Realizar um estudo econômico da depreciação contábil dos equipamentos analisados;
- Combinar as análises técnica e econômica de depreciação para prescrever a melhor estratégia de manutenção a ser adotada.

1.4 CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA EXPLORATÓRIA.

Em relação à forma de abordagem do problema, a presente pesquisa pode ser caracterizada como qualitativa e quantitativa, pois algumas informações são baseadas em dados qualitativos que descreverão valores quantitativos em relação à análise utilizada para a avaliação da depreciação de equipamento. No caso dos critérios quantitativos, as informações para a avaliação em relação aos custos de manutenção, frequência de ocorrência de falhas e número de intervenções corretivas/preventivas, serão obtidas do ERP banco de dados da manutenção (módulo de manutenção do SAP/R3 PM), e de históricos registrados em documentos da empresa cenário da pesquisa.

Do ponto de vista dos objetivos, o trabalho em questão caracteriza-se pela pesquisa do tipo exploratória, uma vez que esta visa proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses (SILVA, apud GIL, 1996).

Do ponto de vista de seus procedimentos técnicos, o trabalho envolve estudo de caso, com a utilização da pesquisa documental, com base em históricos de equipamentos retirados do banco de dados da manutenção. O estudo de caso é caracterizado pelo estudo profundo e exaustivo de um ou de poucos objetos, de maneira que permita o seu amplo e detalhado conhecimento, tarefa praticamente impossível mediante os outros delineamentos considerados (GIL, 1996, p. 58). O estudo de caso é realizado em um ambiente industrial de uma empresa de grande porte do segmento de papel do tipo imprensa. Com o estudo de caso será possível avaliar a sistemática proposta, com intuito de atingir o objetivo principal do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados assuntos relacionados com a temática da pesquisa. Especificamente, o referencial teórico incluirá aspectos que abrangem a definição de manutenção e sua evolução, as estratégias de manutenção, a depreciação econômica de equipamentos, a confiabilidade dos equipamentos, as características da distribuição de Weibull, os custos de manutenção e descritivo técnico do tipo de equipamento objeto de estudo.

2.1 A MANUTENÇÃO E A SUA EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Moubray (2000), define que a função da manutenção evoluiu talvez mais do que qualquer disciplina de gerenciamento, e que as alterações devem-se ao grande aumento na quantidade e diversidade de itens físicos instalados, oriundos de projetos mais complexos, novas técnicas de manutenção com foco nas grandes expectativas relacionadas entre manutenção e qualidade do produto, alta disponibilidade e redução de custos.

A atividade manutenção tem passado por constantes mudanças e alterações ao longo do tempo. Kardec e Nascif (2009) estabelecem que, a partir de 1930, a manutenção pode ser dividida em quatro gerações.

A primeira geração aconteceu antes da Segunda Guerra Mundial, onde a indústria não estava mecanizada e todos os equipamentos e o maquinário eram simples. Nesta fase, a questão de produtividade não era o foco das organizações e, conseqüentemente, a manutenção não priorizava suas ações em atividades sistemáticas. Assim, a sua aplicação era apenas focada aos serviços de limpeza, lubrificação e manutenção do tipo corretiva.

De acordo com Kardec e Nascif (2009), nesta geração, a manutenção centrava-se na competência e nas habilidades para realizar o reparo necessário após a aparição da falha ou da quebra dos equipamentos, o que acontecia pelo desgaste ao longo da vida útil.

Após a Segunda Guerra Mundial, tem-se o início da segunda geração, onde a indústria sofre uma pressão para a confecção de produtos. Neste período, a mão de obra era escassa e, como consequência, houve um forte aumento da

mecanização do parque fabril das empresas. Em busca de uma maior produtividade era necessária uma maior disponibilidade e confiabilidade das linhas de produção; dessa maneira, o foco da manutenção passou a ser a prevenção da falhas dos equipamentos.

As manutenções efetuadas consistiam em revisões gerais dos equipamentos a intervalos de tempos programados, tendo como consequência altos custos de manutenção. Para Kardec e Nascif (2009), nesta fase, a visão sobre a falha do equipamento indicava que todos os equipamentos se comportavam de acordo com a “*bathtub curve*”, curva da banheira, com a qual, a manutenção começou a buscar meios para aumentar a vida útil do maquinário.

A terceira geração foca os recursos em relação ao conceito e utilização da manutenção preditiva, utilização de recursos e uso do avanço da informática. A quarta geração é uma continuação dos recursos da terceira geração utilizando-se de recursos focados para técnicas de confiabilidade, engenharia de manutenção, projetos voltados para confiabilidade e custo do ciclo de vida.

Para Kardec e Nascif (2009) cada vez mais, as falhas provocam sérias consequências em relação à qualidade, segurança e meio ambiente, em um momento em que os padrões de exigências nestas áreas são crescentes. O aumento das expectativas em relação à manutenção é destacado pela maior confiabilidade, maior disponibilidade, melhor relação custo-benefício e preservação do meio-ambiente.

Segundo Moubray (2000), existem seis tipos de padrão de falha: Padrão A, B, C, D, E, F. O padrão A, em relação à curva da banheira, começa com a alta incidência de falha (conhecida como mortalidade prematura ou infantil), seguida de uma probabilidade de falhas constantes e finalizada por um aumento gradual de falhas, que é a zona de desgaste. O padrão B é caracterizado por uma probabilidade de falha constante ou de aumento lento, terminando em uma zona de desgaste. Já o padrão C é identificado com um aumento lento da probabilidade de falha, mas sem a existência de uma idade de desgaste. Para o padrão D, o mesmo possui baixa probabilidade de falha quando o item é novo ou recém saído do reparo e, a partir daí, um rápido aumento a um nível constante. O padrão E é caracterizado por uma probabilidade condicional de falha constante em todas as idades, é também definido com falhas aleatórias. A característica do padrão F tem seu início com altas falhas,

ou seja, mortalidade prematura, que cai eventualmente para uma probabilidade de falha constante.

As mudanças nas técnicas de manutenção são destacadas em relação ao monitoramento da condição dos equipamentos, uso da manutenção preditiva, análise de riscos, *softwares* potentes, projetos voltados para confiabilidade, contratação por mão de obra e serviços.

A quarta geração da manutenção é caracterizada por Kardec e Nascif (2009) como uma evolução da terceira geração. O aumento das expectativas em relação à manutenção é destacado pela maior confiabilidade, maior disponibilidade, preservação do meio-ambiente, segurança, influência nos resultados do negócio e gerenciamento dos ativos.

Em relação à visão quanto à falha do equipamento, a manutenção foca suas ações em reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões tipo A (falhas prematuras ou mortalidade infantil), e o padrão F (altas falhas de mortalidade infantil caindo para uma probabilidade de falha constante) .

As mudanças nas técnicas de manutenção destacam-se em relação ao aumento da prática preditiva e monitoramento da condição, minimização nas manutenções preventiva e corretiva não planejada, análise de falhas, técnicas de confiabilidade, manutenibilidade, engenharia de manutenção, projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e custos do ciclo de vida das instalações e equipamentos.

2.2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

Lafraia (2001) especifica que há duas abordagens organizacionais básicas para a manutenção, sendo uma organização focalizada no reparo e a outra organização focalizada na confiabilidade.

No cenário atual, caracterizado pelo foco na economia globalizada e competitiva, a manutenção tem a necessidade de ser um agente proativo, garantindo a eficiência de suas atividades para o processo de produção. Assim, para ser estratégica, a manutenção precisa agir de maneira eficaz, mantendo a disponibilidade dos equipamentos, evitando falhas e reduzindo ao máximo as paradas de manutenção não planejadas.

Segundo Kardec e Nascif (2009, p.32), “É preciso buscar soluções definitivas e não se conviver com problemas repetitivos, ou seja, a manutenção deve buscar sempre evitar a falha e não corrigi-la cada vez melhor”.

Várias são as estratégias de manutenção adotadas dentro do setor industrial. Algumas destas estratégias são descritas a seguir.

2.2.1 Manutenção com Foco na Produção

Segundo Kardec et al. (2002), a manutenção com visão estratégica precisa estar voltada para os resultados empresariais da organização. É preciso, sobretudo, deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz; ou seja, não basta apenas, reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, mas é preciso, principalmente, manter a função do equipamento disponível para a operação, reduzindo a probabilidade de uma parada de produção ou o não fornecimento de um serviço.

A manutenção com foco na produção é uma estratégia que concentra seus esforços na disponibilidade do equipamento dentro do processo produtivo, considerando a criticidade dos equipamentos. Assim, esta estratégia leva em consideração os custos de perda de produção e os custos de manutenção com o tipo de manutenção a ser adotada, sendo estas manutenções do tipo preditiva, preventiva, engenharia de manutenção e até mesmo uma manutenção do tipo corretiva.

A análise de criticidade dos equipamentos é um balizador para expressar a importância de um equipamento no processo produtivo em relação aos fatores produção, segurança, qualidade e meio ambiente. Assim, em relação aos tipos de falhas nos equipamentos, a criticidade será alta ou baixa conforme for o nível da falha do equipamento para os itens relacionados com a segurança, o meio ambiente e a produção.

Para Furmann (2002, p. 67) em relação à criticidade e priorização dos equipamentos de uma indústria, deve-se:

Atribuir qual é a importância de cada equipamento para o processo produtivo. Essa importância pode ser avaliada com base numa análise de risco de falhas, considerando principalmente a gravidade do impacto decorrente dessas falhas para a função que o equipamento exerce e as respectivas indisponibilidades operacionais imprevistas que comprometem a competitividade empresarial.

2.2.2 Manutenção Corretiva do Tipo Quebra-Conserta

Esta estratégia leva em consideração que o equipamento tem que ser reparado, sendo que o equipamento é substituído por um reserva e, o item que sofreu a manutenção corretiva, consertado. Neste tipo de estratégia de manutenção não é analisado o custo do equipamento depreciado, ou seja, não é avaliado a depreciação econômica do ativo em relação à substituição do mesmo por um ativo novo.

2.2.3 Manutenção Corretiva do Tipo Substituição

Neste tipo de estratégia de manutenção o equipamento é substituído por um novo equipamento. Esta é aplicada em determinados equipamentos, tais como em motores elétricos, pois ao sofrerem uma queima, normalmente estes não são consertados e sim substituídos.

2.3 DEPRECIAÇÃO ECONÔMICA DE EQUIPAMENTOS

A análise de depreciação e obsolescência dos equipamentos faz parte do dia-a-dia da produção, pois o desempenho e a eficiência da produção e da manutenção dependem diretamente das características dos equipamentos e da vida útil dos mesmos. Os conceitos de custos do ciclo de vida dos equipamentos na indústria de produção são constantemente questionados e avaliados em relação à sua capacidade de utilização e custos da manutenção.

Segundo Santos (2008), do ponto de vista contábil, a depreciação pode ser conceituada como o modo em que se registra contabilmente a diminuição do valor de bens do ativo imobilizado, resultante do desgaste pelo uso, pela ação da natureza, perecimento ou pela obsolescência normal.

Existem vários métodos de depreciação, sendo o método linear o mais utilizado. Neste método, a depreciação é distribuída igualmente através do tempo de vida útil do ativo. Um exemplo de depreciação pelo método linear é apresentado no Quadro 1, onde o valor do ativo é de R\$ 25.000,00, e a vida útil é de 5 anos, sendo que a cota de depreciação anual é de 20%.

Ano	Depreciação Anual (R\$)	Depreciação Acumulada (R\$)	Valor contábil do bem (Valor original R\$) Depreciação Acumulada
1	5.000,00	5.000,00	20.000,00
2	5.000,00	10.000,00	15.000,00
3	5.000,00	15.000,00	10.000,00
4	5.000,00	20.000,00	5.000,00
5	5.000,00	25.000,00	0,00

**Quadro 1 - Método linear - Exemplo de depreciação de ativo no valor de R\$ 25.000,00.
Fonte: Santos (2008)**

De acordo com Santos (2008) e, conforme estabelecido no parágrafo único do Art. 310 do RIR/99, a Secretaria da Receita Federal (SRF) publica periodicamente o prazo estipulado de vida útil admissível para equipamentos em condições normais de operação, conforme sua aplicação. A SRF apoiou-se na IN SRF n° 162/98 para indicar uma relação de bens, com seus respectivos prazos de vida útil e taxas de depreciação admissíveis. Esta instrução normativa foi alterada posteriormente para inclusão de outros bens na IN SRF n° 130/99, conforme lista apresentada no Quadro 2.

Referência NCM	Bens	Prazo de vida útil (anos)	Taxa anual de depreciação
8441	Outras máquinas e aparelhos para o trabalho da pasta de papel, do papel ou cartão, incluídas as cortadeiras de todos os tipos	10	10%
8412	Outros Motores e máquinas motrizes	10	10%
8501	Motores e geradores, elétricos, exceto os grupos eletrogêneos	10	10%

**Quadro 2 - Bens relacionados na pela IN SRF n° 130/99 – Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM)
Fonte: Santos (2008)**

Do ponto de vista da manutenção e produção, a depreciação de equipamentos está diretamente relacionada com a eficiência e disponibilidade dos equipamentos. Neste sentido, a depreciação pode ser definida como a perda da função do equipamento para exercer suas atividades, obtendo resultados de baixa disponibilidade e eficiência de produção.

A depreciação dos equipamentos inseridos no parque fabril das empresas brasileiras pode ser observada no documento nacional emitido pela ABRAMAN desde 1985 e divulgado a cada dois anos. A entidade tem pesquisado e divulgado periodicamente os indicadores de *performance* da manutenção nos principais setores de produtos e serviços que movimentam a economia brasileira. Na Figura 2 ilustra-se a idade média dos equipamentos e instalações nas empresas brasileiras até o ano de 2009.

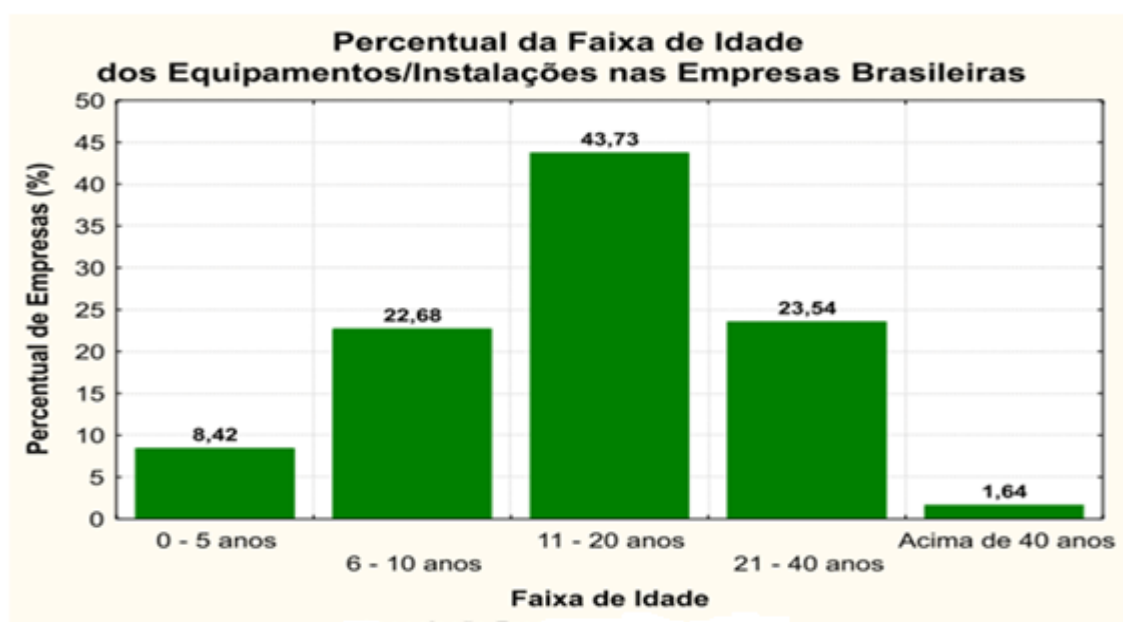


Figura 2 - Idade média dos equipamentos e instalações nas empresas brasileiras
Fonte: Adaptado de ABRAMAN (2009)

2.4 CONFIABILIDADE

A confiabilidade está diretamente ligada à confiança de um produto ou equipamento. Ela representa o potencial e a capacidade de um determinado produto ou equipamento para trabalhar em condições normais sem que o mesmo venha a falhar.

Para Kardec e Nascif (2009), o termo confiabilidade na manutenção teve sua origem em análises de falhas realizadas em equipamentos eletrônicos de uso militar na década de 50, nos Estados Unidos.

Confiabilidade, do inglês *Reliability*, é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo. O termo confiabilidade $R(t)$ é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade (NBR 5462-1994).

Do ponto de vista estatístico, Lafraia (2001) define confiabilidade como a probabilidade de que um componente ou sistema funcione dentro de seus limites especificados em projeto, e não venha a falhar durante o período previsto para sua vida, considerando as condições de agressividade ao meio. Esta definição possui quatro elementos básicos:

- Quantificação da confiabilidade em termos de probabilidade;
- Definição de desempenho requisitado ao produto, onde a precisão exigida do sistema também poderá alterar a confiabilidade, pois quanto mais restrita for a exigência, mais facilmente pode-se retirar o sistema da faixa.
- Tempo de operação exigido entre as falhas.
- Definição das condições ambientais em que o equipamento deve funcionar.

De acordo com Neale (2001), a confiabilidade é o tempo médio que os dispositivos de um determinado projeto irão funcionar sem apresentar falhas no decorrer da sua operação. Assim, para assegurar que a falha não ocorra antes da vida especificada, é necessário que o projeto de um produto ou equipamento seja especificado para o regime de trabalho ao qual será submetido. Quando um limite para operação sem falhas é aceito, a escolha deste limite depende da disponibilidade exigida a partir do dispositivo.

Neale (2001) define a disponibilidade como a porcentagem média de tempo que um dispositivo está disponível para proporcionar um desempenho satisfatório durante o seu período de funcionamento.

A curva característica da vida de equipamentos, também conhecida como “Curva da Banheira”, é uma característica relacionada à confiabilidade de um equipamento. Ela expressa a taxa de falhas (número de falhas por unidade de tempo) em função do tempo (vida), sendo representada na Figura 3. Segundo

Kardec e Nascif (2009), esta curva é considerada como um padrão de comportamento de equipamentos e sistemas.

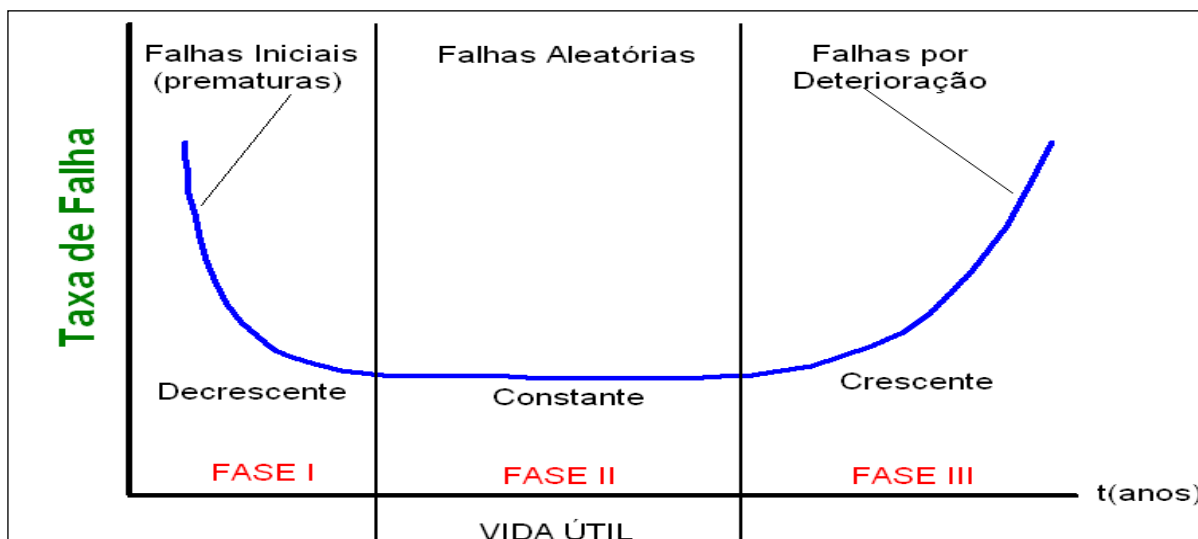


Figura 3 - Probabilidade de falha durante a vida útil do equipamento - Curva da Banheira
 Fonte: Adaptado de Souza (2007)

A curva da banheira é composta de três fases que completam o ciclo de vida do equipamento. Estas são conhecidas como fase de mortalidade prematura ou infantil, fase de maturidade e fase de mortalidade, sendo caracterizadas pelas falhas iniciais prematuras, falhas aleatórias e falhas por deterioração, respectivamente.

Na fase I, a taxa de falha decresce com o tempo. Dodson (2006) estabelece que, na fase de mortalidade infantil, as falhas são do tipo falhas prematuras causadas por defeitos em materiais, materiais inadequados, erros de fabricação, danos de instalação ou danos relacionados com o transporte. Sellito (2005) acrescenta que deficiências no projeto ou concepção do equipamento ou suas peças são também uma causa importante das falhas no período de mortalidade infantil. Nesta fase, a confiabilidade pode ser aumentada de maneira importante ao serem resolvidos esses problemas.

De acordo com Souza (2007), a probabilidade de falha tem comportamento decrescente no início da vida do equipamento, bem como os custos de manutenção envolvidos. É na fase da mortalidade infantil que os equipamentos passam por um período de ajustamento e amaciamento.

A fase II é caracterizada como a fase da maturidade, onde ocorrem falhas pouco previsíveis e falhas aleatórias. Souza (2007) estabelece que, nesta fase, os custos de manutenção e a probabilidade de falhas podem ser considerados

constantes, e que a ocorrências de falhas são suficientemente raras se forem adotadas ações de Manutenção Preventiva. Esta fase é considerada a mais longa no período de vida do equipamento. As principais causas de falhas são atribuídas a erros de operação, falta de inspeção pelas equipes de manutenção e falha no planejamento da manutenção preventiva.

Na fase III tem-se o período da mortalidade do equipamento, onde a taxa de falha é crescente, e é considerada uma transição entre o final do período de vida útil e o início do período de envelhecimento do equipamento. Nesta fase a taxa de falha é crescente, e é conhecida como período de envelhecimento, no qual os equipamentos estão em fase de degeneração dos componentes, apresentam-se desgastes naturais, e possíveis erros de manutenção e erros de diagnósticos.

Na fase de falhas por deterioração, no final da vida do equipamento, pode-se optar por trocar o equipamento ou reformá-lo. Neste último caso, a manutenção faz com que se inicie uma nova curva da banheira, mas com um ciclo menor, e o período de fase-II, com uma probabilidade de falha maior.

No trabalho publicado por Sellito (2005), é apresentada a “Curva da Banheira” e as estratégias de manutenção adotadas em cada uma das fases, com seus dados modelados através da distribuição de Weibull. De acordo com o autor, na fase da mortalidade infantil, uma estratégia de manutenção corretiva identifica e sana estas deficiências. Na fase de maturidade, a estratégia de manutenção preditiva e a gestão de boas práticas de manutenção atuam neste período. Na fase da mortalidade, o início desta pode ser detectada pelas ações da manutenção preditiva adotada na fase anterior, levando a uma estratégia de manutenção preventiva seguida de reforma ou emergência.

Numa indústria existem diferentes modos de falhas, tanto para equipamentos como para os processos como um todo. Assim, faz-se necessário à aplicação dos conhecimentos de confiabilidade em relação aos elementos críticos de um processo o maquinário. É por isso que, para serem competitivas, as indústrias precisam avaliar constantemente a confiabilidade de seus equipamentos, a fim de reduzir a probabilidade de falhas, aumentando sua disponibilidade e capacidade de produção.

2.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL: A PROBABILIDADE DE FALHA

A probabilidade de falha é a probabilidade que um equipamento tem de não estar disponível ou trabalhando em condições normais até um determinado período de tempo “t” depois de transcorrida a falha anterior. O contrário da probabilidade de falha é a probabilidade de sobrevivência, que em manutenção pode ser caracterizada como a probabilidade que um equipamento tem de permanecer operando normalmente.

Segundo Branco Filho (2008, p. 4), a distribuição de Weibull foi proposta no ano de 1937 pelo físico Ernest Hjalmar Wallodi Weibull. De acordo com esta distribuição, a probabilidade de falha é dada pela expressão:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]$$

onde,

t = tempo transcorrido

β = fator de forma

η = vida característica

t_0 = vida mínima.

Os valores que o fator de forma β pode assumir estão na faixa de zero a infinito, mas na prática os valores encontrados são menores que 0,2 ou maiores que 10. Para cada valor de β , tem-se as seguintes características relacionadas ao tipo de falha.

O parâmetro de escala η = vida característica, esta associado à vida característica de um determinado componente, onde esta variável descreve um tempo ou ciclos transcorridos desde o início da atividade até o momento da falha, onde as falhas tendem a ocorrer nas proximidades de sua vida característica.

- **Beta < 1** – Se $\beta < 1$ o tipo de falha é caracterizado como “falha do tipo mortalidade infantil” ou falha do tipo prematura;
- **Beta = 1** – Se $\beta = 1$ o tipo de falha é caracterizado como “falha do tipo aleatória”, ou falhas que não dependem do tempo de uso da máquina ou das condições de trabalho para ocorrerem;
- **Beta > 1** – Se $\beta > 1$ o tipo de falha é caracterizado como “falha do tipo fim de vida útil”, ou falha do tipo fim de vida econômica. Estas falhas dependem do tempo de uso da máquina e das condições de trabalho.

Na Figura 4 apresenta-se a “curva da banheira” relacionada ao fator de forma (β), ao ciclo de vida do equipamento, à estratégia de manutenção e ao tipo de falha no equipamento.

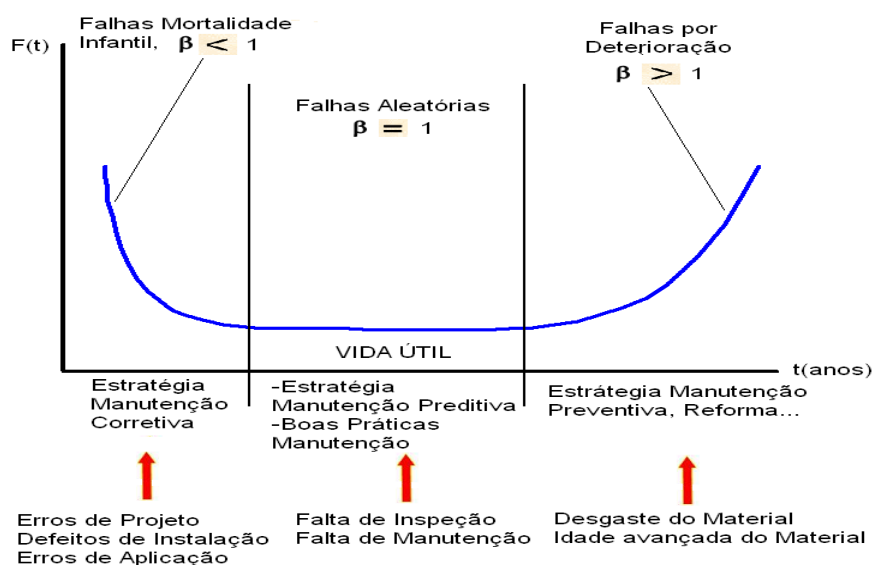


Figura 4 - Estratégia de manutenção e o comportamento do equipamento em função da forma de distribuição de Weibull na Curva da Banheira
Fonte: O autor

2.6 CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Os custos de manutenção definem e balizam as ações que foram decididas, bem como, as estratégias de manutenção adotadas para manter a disponibilidade operacional, a eficiência dos equipamentos e a produção.

Para Kardec e Nascif (2009), os custos de manutenção em relação à manutenção em nível empresarial, são avaliados através de dois indicadores:

- Custo da Manutenção em relação ao faturamento bruto da empresa (%);

- Custo da Manutenção em relação ao patrimônio (valor estimado dos ativos) (%).

O comportamento do custo de manutenção em relação ao faturamento bruto das empresas em 2009, apresentado pela ABRAMAN (2009), é ilustrado na Figura 5.

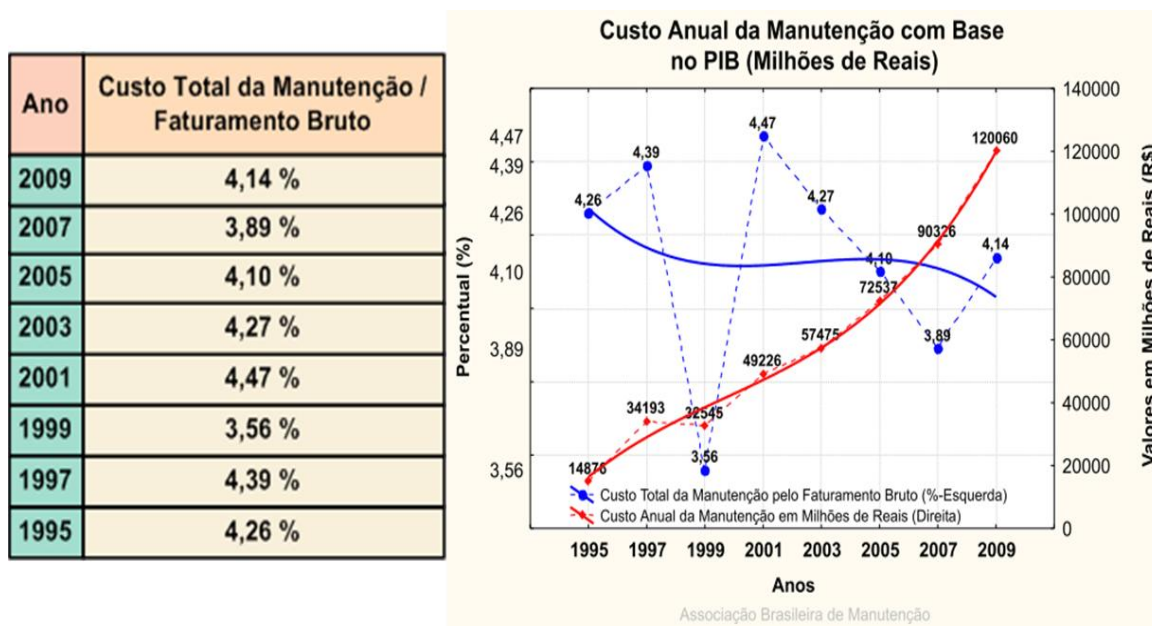


Figura 5 - Custo da manutenção em relação ao faturamento das empresas
Fonte: Adaptado de Abramam (2009)

Os orçamentos apertados e a depreciação de equipamentos são o grande desafio da estratégia de manutenção em relação ao controle dos custos de manutenção e à aplicação de recursos que garanta a eficiência da estratégia de manutenção.

Várias são as funções de custos em relação à estratégia de manutenção, sendo estas funções obtidas a partir dos seguintes itens:

- Custo total da manutenção.
- Custo de perda de produção causada por falhas em equipamentos - “Manutenção com foco na produção”;
- Custo total de manutenção por equipamento “Manutenção corretiva do tipo substituição”;
- Custo total de manutenção corretiva por equipamento “Manutenção corretiva do tipo quebra-conserta”;

A destinação destes custos de manutenção é de grande importância e devem ser alocados de maneira correta nos equipamentos e instalações, a fim de

construir o histórico de custo do equipamento e o histórico econômico do equipamento. Estes custos devem ser apontados nas ordens de serviços, podendo ser realizados manualmente ou através de sistemas informatizados, com o propósito de garantir um histórico confiável da vida útil do equipamento e da instalação. Estes históricos fornecerão informações quantitativas para avaliar os custos de manutenção em relação à frequência de falhas e à estratégia de manutenção adotada.

2.7 MOTOR ELÉTRICO

Um motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica, baixo custo operacional, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando.

Os motores elétricos são equipamentos de grande importância utilizados pela indústria de produção, tanto por sua utilidade, quanto pelo seu custo. Durante o seu ciclo de vida estes equipamentos estão expostos a diferentes condições operacionais, como sobrecargas mecânicas advindo do sistema acionado, harmônicos, aquecimentos, vibrações mecânicas, variações de tensões advindas do sistema de fornecimento de energia. Todas estas variáveis interferem e podem causar degradações no sistema de isolamento do bobinado estatórico do motor.

Dentro do parque fabril, os motores elétricos são equipamentos considerados de características intercambiáveis, pois são fabricados dentro de normas internacionais e nacionais. A sua característica e forma construtiva é determinada pelo modelo de sua carcaça, que define o tamanho, a altura e a potência do equipamento.

A degradação e a depreciação da vida útil dos motores elétricos estão diretamente ligadas às condições de instalação, bem como às condições da aplicação e às estratégias de manutenção adotadas.

Souza (2007) estabelece que a forma de utilização dos equipamentos em relação às condições operacionais em que o equipamento esta submetido e o ambiente no qual está instalado, são condições que afetam a confiabilidade.

Uma estratégia de manutenção adotada para estes equipamentos é sempre desejável para que se possam prever as condições de esforços mecânicos, condições de temperatura, condições de isolamento do bobinado estatórico e condições elétricas, evitando uma queima do equipamento.

O motor elétrico do tipo indução trifásico é composto fundamentalmente de duas partes: Estator e Rotor. Os principais componentes deste tipo de motor são ilustrados na Figura 6.

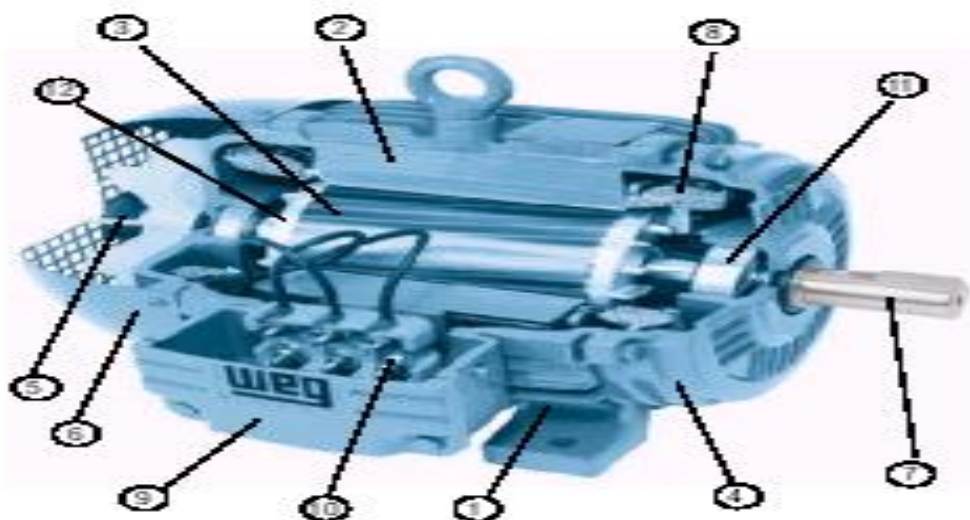


Figura 6 - Motor de indução trifásico
Fonte: WEG (2010)

onde:

1 - Carcaça – é a estrutura suporte do conjunto; de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas para refrigeração;

2 - Núcleos de chapas – as chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro;

3 - Núcleo de chapas – as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator;

4 - Tampa;

5 - Ventilador;

6 - Tampa defletora;

7 - Eixo - transmite a potência desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas tais como empenamento e fadiga;

8 - Enrolamento trifásico – são três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação;

9 - Caixa de ligação;

10 - Terminais;

11 - Rolamentos;

12 - Barras de anéis de curto-circuito – são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

2.8 DEFEITOS NO ESTATOR DE MOTORES ELÉTRICOS

Cruz (2004) estabelece que as falhas que ocorrem nos enrolamentos estatóricos resultam da interação de diversos mecanismos de fadiga de natureza térmica, elétrica, mecânica e ambiental.

As condições operacionais, elétricas, mecânicas e ambientais em relação ao equipamento elétrico, podem reduzir drasticamente a vida útil do enrolamento do motor. A seguir são apresentados os principais tipos de falhas nos enrolamentos (bobinado) de motores elétricos, bem como algumas falhas que caracterizam o tipo de falha e possíveis ações de manutenção em relação ao tipo de falha.

Bonnett e Soukup (1992) em seu estudo sobre falhas em motores elétricos de indução, definem que as falhas ocorrem em relação aos seguintes itens:

- Térmica;
- Elétrica;
- Mecânica;
- Ambiental;

Os tipos de falhas nos enrolamentos do motor de indução com circuito em ligação em estrela é apresentado na Figura 7.

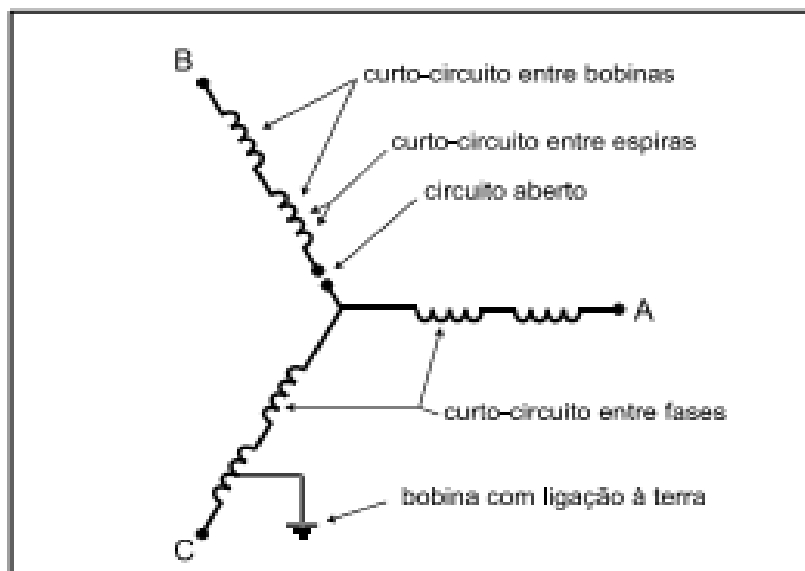


Figura 7 – Estator conectado Ligação Estrela - Possíveis Modos de Falhas
Fonte: IEEE (1992)

2.8.1 Falha Curto entre Espiras ou Bobinas Curto-Circuitada

Este tipo de falha origina-se geralmente por causa de um sobre aquecimento da bobina, antes da ocorrência do rompimento das espiras. Este tipo de falha é tipicamente causado por contaminação do enrolamento, abrasão, vibração ou surtos de tensão, podendo ser agravada por falhas ou ineficiência do processo de impregnação, incluindo-se aí a utilização de condutores e verniz ou resina de má qualidade, mal preservados, ou incompatíveis com a classe térmica e tensão do equipamento, além do processo inadequado de cura (Figura 8).

CURTO DE ESPIRAS

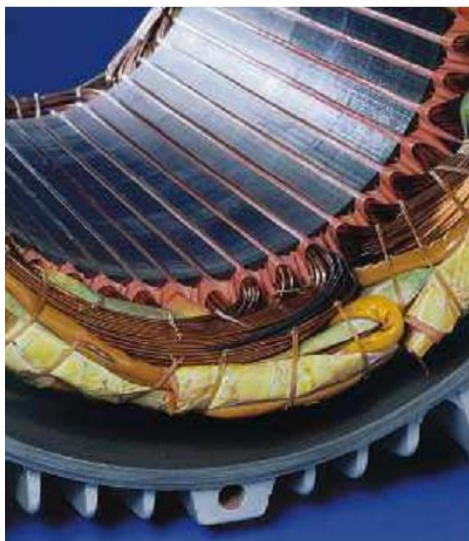
BOBINA
CURTO-CIRCUITADA

Figura 8 - Falha do Tipo: Curto Entre Espiras e Bobina Curto-Circuitada.
Fonte: WEG (2010)

2.8.2 Curto-Circuito entre Fases

Este tipo de falha no isolamento é tipicamente causado por contaminação do enrolamento e degradação do material isolante por ressecamento, devido à alta temperatura de operação do motor (Figura 9).

CURTO ENTRE FASES

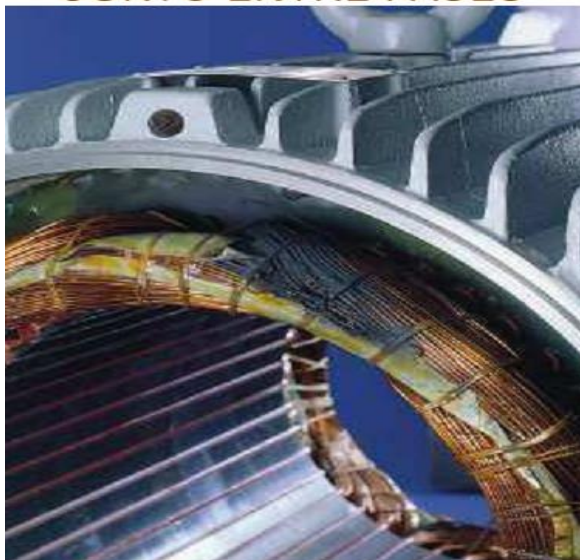


Figura 9 - Tipo de falha curto-circuito entre fases
Fonte: WEG (2010)

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo descrevem-se os recursos e procedimentos utilizados no desenvolvimento da presente pesquisa.

3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O fluxograma da Figura 10 apresenta o esquema adotado para a análise depreciativa dos equipamentos estudados. De acordo com esta estrutura, inicialmente dois procedimentos ou rotas são definidos, a fim de desenvolver separadamente uma análise técnica e outra econômica. Na etapa final, as duas análises são combinadas para a obtenção da melhor estratégia de manutenção sugerida.

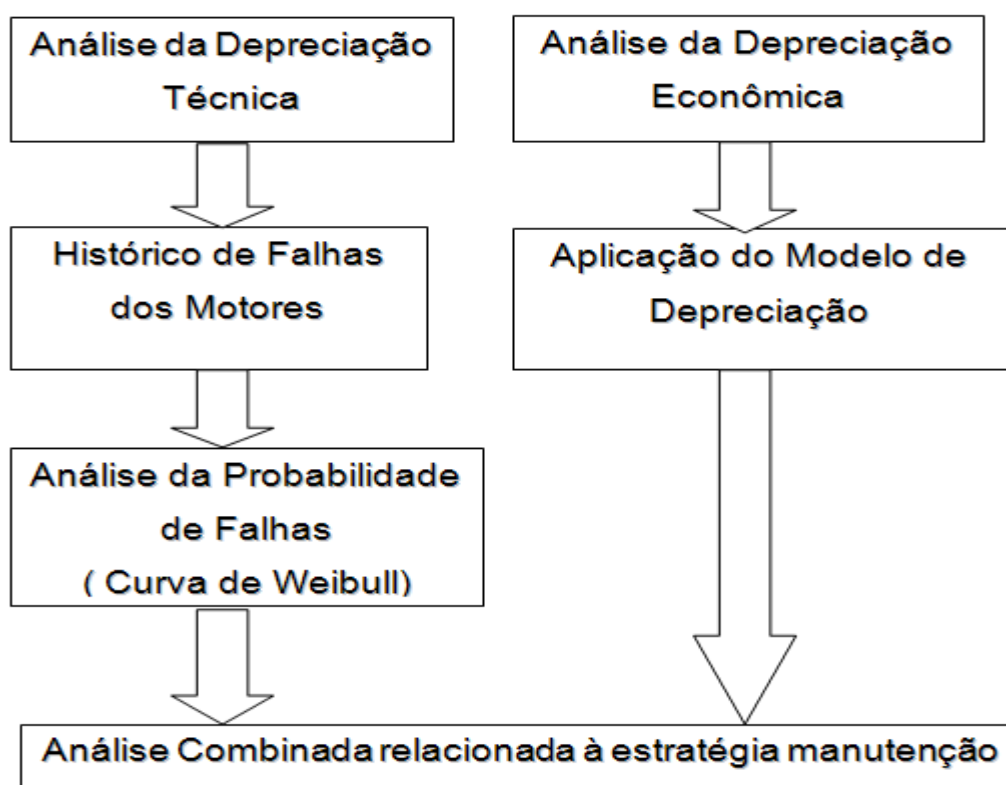


Figura 10 - Fluxograma: procedimento metodológico
Fonte: O autor

A descrição de cada uma das etapas ilustradas no fluxograma é apresentada a seguir.

3.1.1 Análise de Depreciação Técnica

3.1.1.1 Descrição da amostra dos equipamentos analisados

Os equipamentos objeto de estudo estão instalados numa empresa do ramo de fabricação de Papel Imprensa, localizada na cidade de Jaguariaíva, no Estado do Paraná. O parque fabril desta empresa possui aproximadamente 1.000 motores elétricos do tipo indução de corrente alternada, distribuídos nos equipamentos do processo produtivo. Os motores instalados nesta planta são do ano de 1984. No entanto, para o histórico de falhas, foram apenas obtidos os registros a partir do ano de 1991.

No estudo em questão foram coletados informações e históricos de manutenção de um total de 607 motores que tiveram manutenções do tipo corretiva e manutenções do tipo preventiva, desde o ano de 1991 até o ano de 2010. A Figura 11 ilustra o perfil dos motores instalados em comparação com os motores com histórico de falhas.

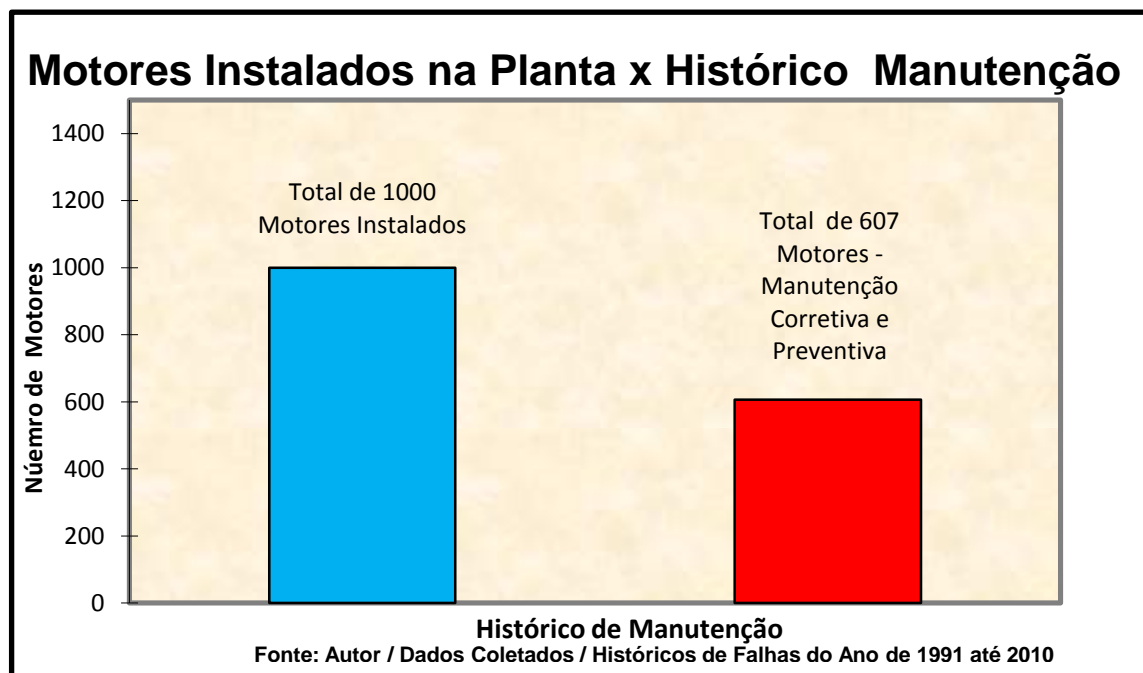


Figura 11 - Dados coletados / históricos de falhas motores desde o ano de 1991 até 2010
Fonte: O autor

Os históricos de manutenção foram obtidos do banco de dados da manutenção da empresa em questão, sendo que estes históricos de manutenção relatam as manutenções efetuadas em motores de corrente alternada.

3.1.1.2 Histórico de falhas dos motores

Nesta fase foi analisado o histórico dos motores elétricos ao longo de sua vida útil, considerando a vida útil do equipamento, o número de falhas apresentadas, os tipos de manutenção aos quais são submetidos e os custos de manutenção correspondentes.

O histórico de manutenção dos motores abrange um total de 607 motores que sofreram manutenção do tipo preventiva e corretiva. Foram selecionados somente aqueles que tiveram problemas/falhas no seu bobinado (estator). O motor que teve um evento ou falha correspondeu a aquele motor que sofreu uma manutenção corretiva. Como se observa na Figura 12, 263 motores precisaram de um total de 425 manutenções do tipo corretiva pela queima do seu bobinado estatórico.

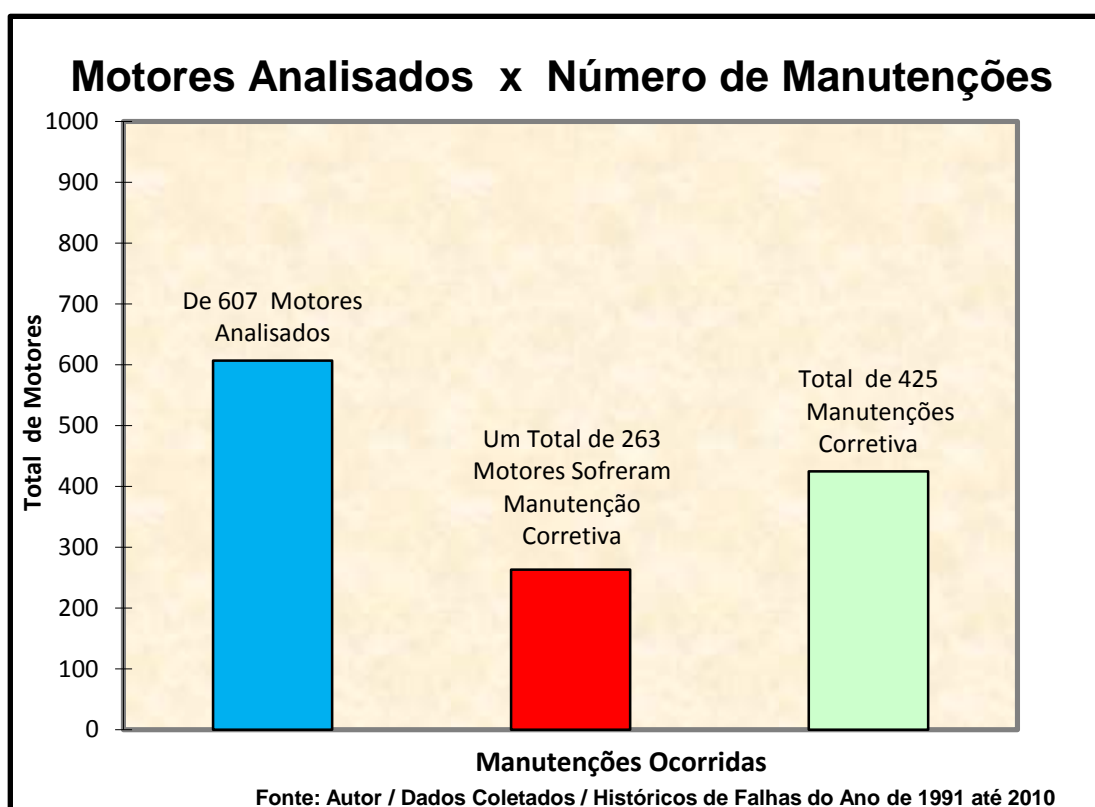


Figura 12 - Motores selecionados que tiveram falhas no bobinado estatórico
Fonte: O autor

Do total de 607 motores analisados, foram selecionados e analisados somente os motores que tiveram mais de dois eventos (falhas), durante o período de análise dos históricos (desde o ano de 1991 até o ano de 2010). Assim, apenas um

total de 31 motores foram selecionados, sendo que o número total de manutenções corretivas nestes motores foi de 137, como ilustrado na Figura 13.

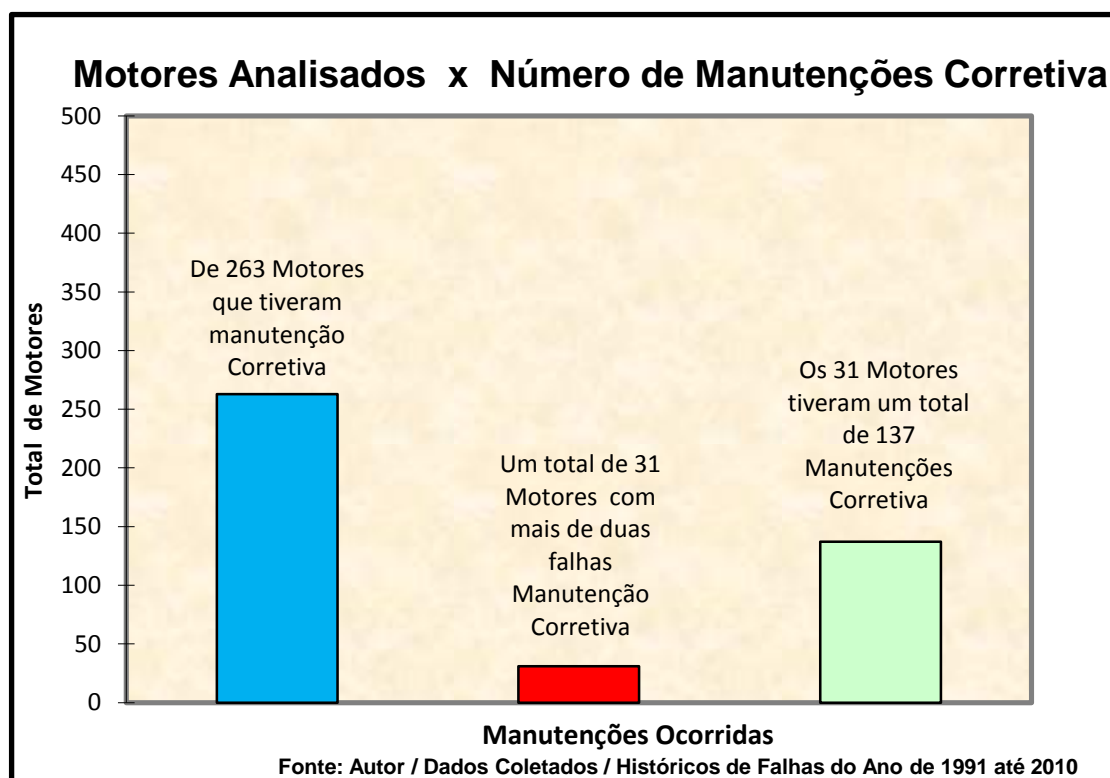


Figura 13 - Dados dos motores selecionados que tiveram mais de duas falhas durante o período analisado, desde 1991 até 2010

Fonte: O autor

O Quadro 3 apresenta as informações dos 31 motores selecionados para análise. Estas informações destacam o TAG do motor, a potência elétrica do motor em (kW e CV), e o número de manutenções corretivas executadas (**NMc**), que representam igual número de falhas ocorridas nestes equipamentos durante o período de estudo.

Motores Selecionados para Análises		
Motor Número (Tag do Motor)	Potência (kW/CV)	NMc - N° Manutenção Corretiva
783	0,18kW/0,25CV	3
1042	0,18kW/0,25CV	3
968	0,25kW/0,33CV	8
969	0,25kW/0,33CV	3
970	0,25kW/0,33CV	3
971	0,25kW/0,33CV	4
975	0,25kW/0,33CV	10

979	0,25kW/0,33CV	5
997	0,25kW/0,33CV	4
1005	0,25kW/0,33CV	4
1006	0,25kW/0,33CV	6
1609	0,25kW/0,33CV	3
1437	0,37kW/0,5CV	6
1438	0,37kW/0,5CV	5
1451	0,37kW/0,5CV	3
1452	0,37kW/0,5CV	5
1462	0,37kW/0,5CV	5
1466	0,37kW/0,5CV	4
1467	0,37kW/0,5CV	5
1059	0,75kW/1CV	3
549	5,5kW/7,5CV	5
1615	5,5kW/7,5CV	3
1080	18kW/25CV	8
131	55kW/75CV	4
178	55kW/75CV	4
117	93kW/125CV	4
121	93kW/125CV	3
78	150kW/200CV	3
79	150kW/200CV	4
80	150kW/200CV	4
1075	186kW/250CV	3

Quadro 3 - Total de 31 motores selecionados que tiveram mais de 2 falhas (queima do bobinado), no período de análise de falhas desde o ano de 1999 até 2010

Fonte: O autor

3.1.1.3 Análise da probabilidade de falhas (Curva de Weibull)

Os históricos de ocorrência de falha (queima do bobinado estático) do equipamento foram coletados do banco de dados da empresa, com as informações de manutenção preventiva e manutenção corretiva dos equipamentos.

A distribuição de Weibull, através do seu fator de forma (β), deverá representar uma curva típica de falhas prematuras, de falhas aleatórias e de falhas por deterioração, ajudando a definir a fase da vida útil na qual o equipamento se encontra.

Os intervalos de falhas foram modelados pelo Software Weibull ++ 7 ®, licenciado pela empresa, obtendo-se a probabilidade de falha ilustrada na Figura 14.

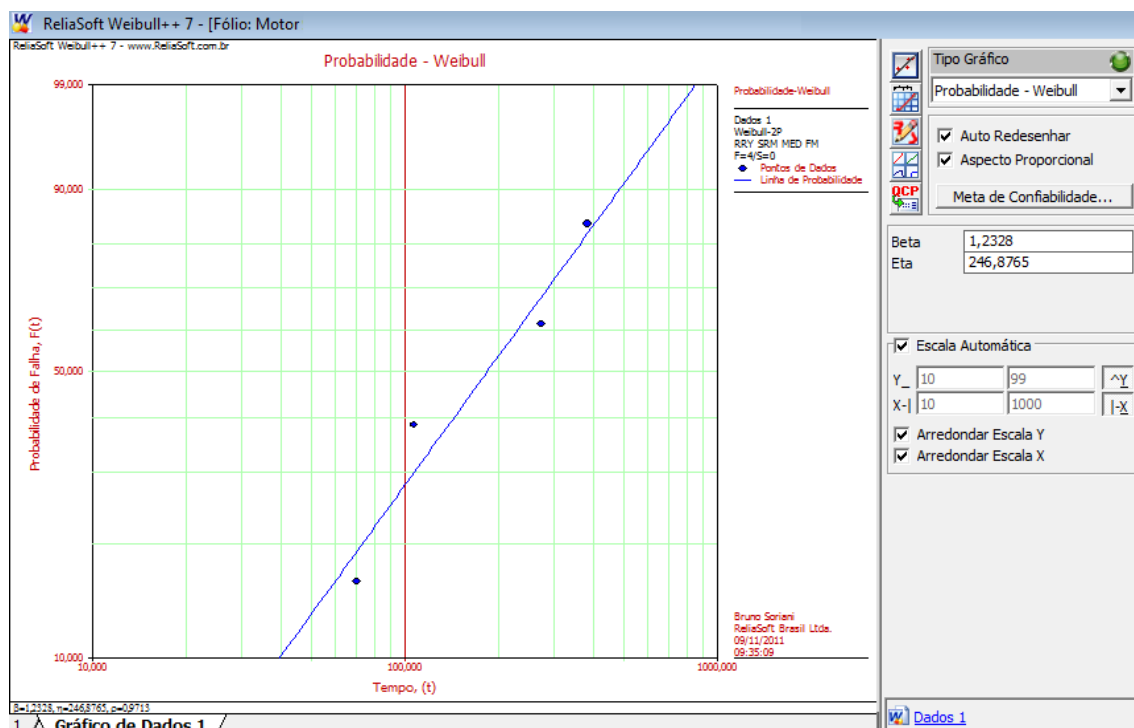


Figura 14 - Papel de probabilidade de Weibull para dados de falhas ocorridas no bobinado do motor elétrico
Fonte: O autor

Na figura acima, apresenta-se um exemplo do caso de uma análise de dados de falhas de um motor com um total de 4 eventos, onde o tipo de gráfico representa a probabilidade de falha $F(t)$ no tempo, isto é, a probabilidade de Weibull. No gráfico se observam os pontos correspondentes aos 4 eventos ou falhas, acompanhados da respectiva linha de ajuste da probabilidade (azul).

Os valores referenciados na extremidade superior à direita do gráfico representam o valor do fator de forma (β) e a vida característica (η).

O valor do fator de forma foi testado mediante implantação de modelo de cálculo em planilha Excel. As características das 4 falhas acima descritas são apresentadas no Quadro 4. Neste quadro, mostra-se o número de dias em que o motor ficou em funcionamento após ter passado por quatro falhas e por quatro manutenções corretivas durante o período de análise dos históricos de manutenção.

Tempo até Falha	Eventos	MR (Média Rank)	$1/(1-MR)$	$\ln(\ln(1/(1-MR)))$	$\ln(\text{Tempo até a Falha})$
70	1	0,159090909	1,189189189	-1,752894273	4,248495242
107	2	0,386363636	1,62962963	-0,716717249	4,672828834
274	3	0,613636364	2,588235294	-0,050266149	5,613128106
384	4	0,840909091	6,285714286	0,608830072	5,950642553

Beta	1,231900
------	----------

Quadro 4 - Cálculo do valor de beta através do uso do software Excell
Fonte: Dorner (1999)

A seguir são apresentados, mediante execução de um caso exemplo, os passos adotados para traçar o gráfico de Weibull e calcular o valor de Beta.

No exemplo de teste de confiabilidade de um equipamento, foram obtidos os seguintes intervalos de falhas em número de horas:

Tempo de Falha (T_i): 93, 34, 16, 120, 53 e 75.

- Primeiro, ordena-se a amostra pelos tempos até falha e classificam-se os tempos de falhas em ordem crescente, como mostrado na Tabela 2 a seguir.

Tempo até a falha, hrs	Número de Ordem falha N= 6
16	1
34	2
53	3
75	4
93	5
120	6

Tabela 2 – Exemplo de Weibull Excell
Fonte: O Autor

No papel de probabilidade Weibull, no eixo X, são inseridos os valores referentes ao tempo de falhas, e no eixo Y, são inseridos os valores da probabilidade de falha acumulada.

Uma amostra de um papel de probabilidade de Weibull é ilustrada na Figura 15.

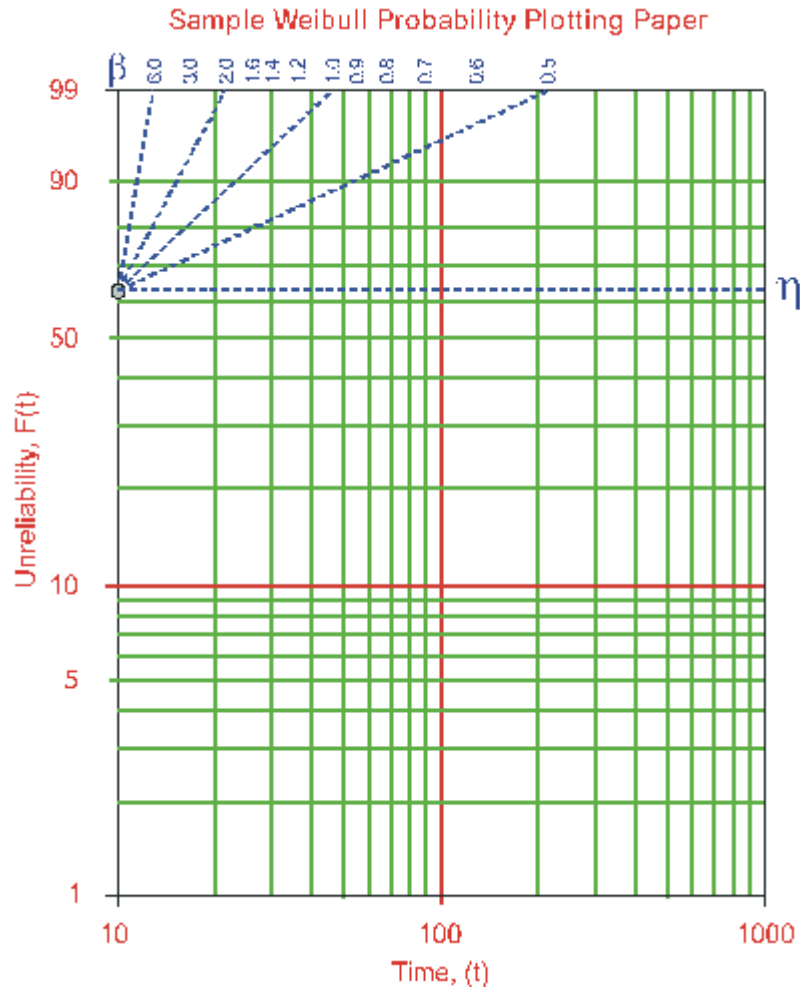


Figura 15 - Exemplo de Weibull papel de probabilidade de plotagem

O valor de probabilidade de falha acumulada é obtido utilizando a seguinte equação,

$$MR\% \sim \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \cdot 100,$$

onde i é o número de ordem de falha e N é o tamanho total da amostra.

Exemplo: Primeiro tempo de falha;

$$16 \Rightarrow i=1 \Rightarrow \text{eixo } X=16 \Rightarrow \text{eixo } Y = \left(\frac{1-0,3}{6+0,4} \right) \cdot 100 = 10,91\%$$

Tempo até a falha; (h)	Probabilidade de Falha Acumulada MR (%)
16	10,91
34	26,44
53	42,14
75	57,86
93	73,56
120	89,10

Tabela 3 – Exemplo de Weibull Excell
Fonte: O Autor

Posteriormente, são inseridos os seguintes valores no papel de Weibull nas ordenadas do eixo (X;Y) para os seis pontos, conforme dados a seguir: (16;10,91); (34;26,44); (53;42,14); (75;57,86); (93;73,56); (120;89,10).

Finalmente, traça-se a linha reta que passe pela maior quantidade de pontos possíveis como mostrado na Figura 16, onde o valor de β é a inclinação da reta, ou seja a tangente do ângulo entre a reta e o eixo X. Neste caso $\beta = 1,4$.

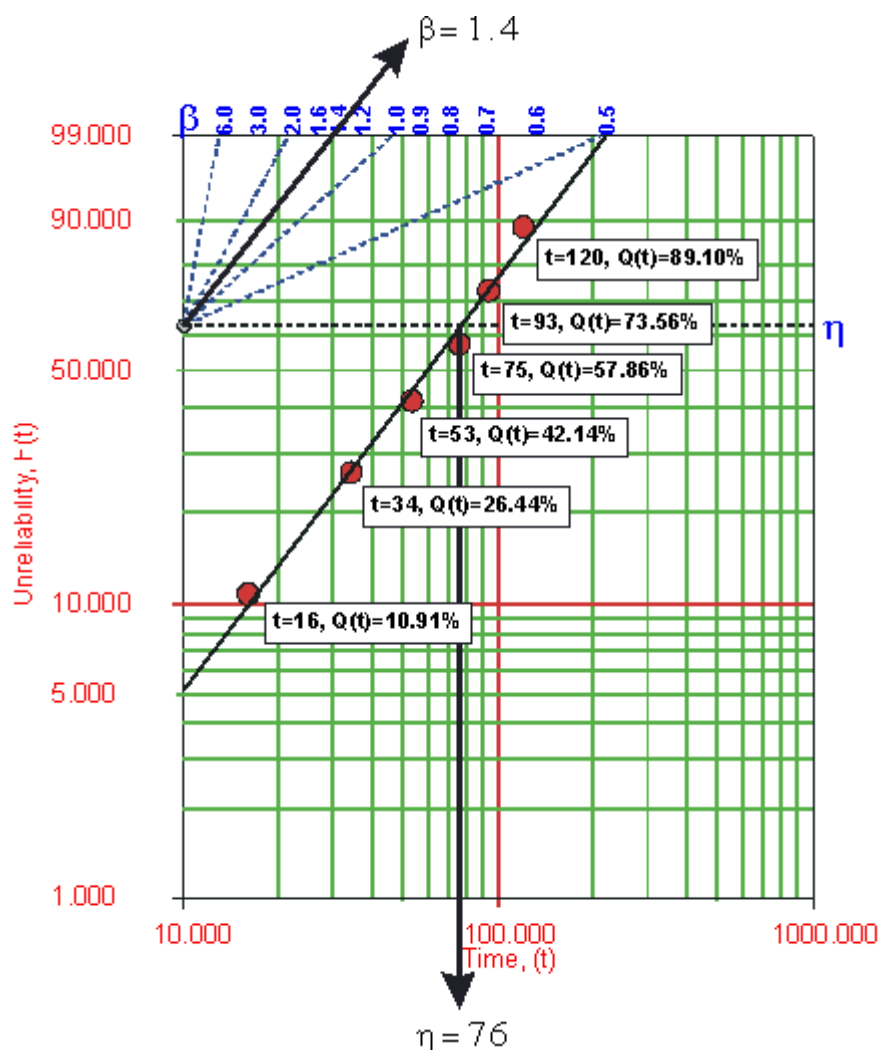


Figura 16 - Gráfico de probabilidade de dados do Exemplo 1

3.1.2 Análise da Depreciação Econômica

Após a análise da distribuição de falha no equipamento, os fatores de forma (valores β) de cada tipo de equipamento foram relacionados com o tempo de vida útil do equipamento, com a finalidade de se avaliar o grau de depreciação técnica dos motores. Adicionalmente, os custos das manutenções corretivas executadas nos equipamentos foram analisados, a fim de se avaliar a depreciação contábil do equipamento.

Com as etapas de análise descritas acima, defini-se o critério que conjuga os itens: tipo de falha no equipamento obtido mediante análise da distribuição de Weibull, custo de manutenção durante a vida útil do equipamento e depreciação econômica do equipamento em relação ao valor de um novo ativo, a fim de escolher

a estratégia de manutenção que deverá ser implementada para cada probabilidade de falha ocorrida nos motores de corrente alternada.

A depreciação econômica **DE**, para os fins de registros contábeis registra a depreciação do equipamento ou ativo ao longo do tempo.

Conforme Quadro 1 (santos, 2008) onde foi apresentada a relação de depreciação linear para motores e máquinas motrizes, com um prazo de vida útil de 10 anos e taxa de depreciação contábil de 10% ao ano durante os 10 anos, apresenta-se no quadro 5 o mesmo método para cálculo da depreciação econômica.

Aplicação do modelo de depreciação

Para um motor de potência de (0,75kW/1CV), por exemplo, o custo do ativo novo (**CAn** - Custo Ativo), é de R\$ 505,00. No Quadro 5 é apresentada a depreciação contábil deste motor, considerando como data inicial de compra o ano de 1984 até a data de análise do estudo em questão (2010).

Ano	Depreciação Anual (R\$)	Depreciação Acumulada (R\$)	Valor Contábil do Ativo
1984	50,50	50,50	454,50
1985	50,50	101,00	404,00
1986	50,50	151,50	353,50
1987	50,50	202,00	303,00
1988	50,50	252,50	252,50
1989	50,50	303,00	202,00
1990	50,50	353,50	151,50
1991	50,50	404,00	101,00
1992	50,50	454,50	50,50
1993	50,50	505,00	0,00
1994	0,00	505,00	0,00
1995	0,00	505,00	0,00
1996	0,00	505,00	0,00
1997	0,00	505,00	0,00
1998	0,00	505,00	0,00
1999	0,00	505,00	0,00
2000	0,00	505,00	0,00
2001	0,00	505,00	0,00
2002	0,00	505,00	0,00
2003	0,00	505,00	0,00
2004	0,00	505,00	0,00
2005	0,00	505,00	0,00

2006	0,00	505,00	0,00
2007	0,00	505,00	0,00
2008	0,00	505,00	0,00
2009	0,00	505,00	0,00
2010	0,00	505,00	0,00

Quadro 5 - Análise de depreciação contábil de motor selecionado para o estudo
Fonte: O autor

No Quadro 6 apresentam-se os valores em reais referentes aos motores que são objetos de estudo, onde são apresentados os custos unitário da manutenção corretiva **CuMC**, **CAn**, custos do ativo novo (compra do motor novo) e o **CTuMCP**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva.

No caso de ativo novo, todos os valores apresentados foram solicitados ao fabricante, enquanto que, os valores referenciados a manutenção corretiva, foram fornecidos pela assistência autorizada do fabricante.

Potência Motor (kW/CV)	CuMC – Custo Unit. Manutenção Corretiva – R\$	CAn - Custo Ativo Novo – R\$	CTuMCP
0,18kW/0,25CV	R\$ 175,00	R\$ 352,41	R\$ 240,75
0,25kW/0,33CV	R\$ 180,00	R\$ 381,56	R\$ 245,75
0,37kW/0,5CV	R\$ 202,00	R\$ 410,69	R\$ 267,75
0,75kW/1CV	R\$ 220,00	R\$ 475,39	R\$ 285,75
5,5kW/7,5CV	R\$ 580,00	R\$ 1.267,66	R\$ 645,75
18kW/25CV	R\$ 1.800,00	R\$ 4.050,00	R\$ 1.805,75
55kW/75CV	R\$ 3.600,00	R\$ 8.769,53	R\$ 3.665,75
93kW/125CV	R\$ 5.800,00	R\$ 15.159,07	R\$ 5.865,75
150kW/200CV	R\$ 8.400,00	R\$ 20.961,18	R\$ 8.465,75
186kW/250CV	R\$ 10.990,00	R\$ 24.662,93	R\$ 11.055,75

Quadro 6 - Informação custo do ativo novo e custo para executar manutenção corretiva (rebobinar o estator do motor)
Fonte: WEG (2010)

3.1.3 Análise Combinada Relacionada à Estratégia de Manutenção

A análise combinada avalia os resultados da análise da depreciação técnica e da análise de depreciação econômica, a fim de definir qual é o critério a ser adotado em relação à estratégia de manutenção a ser executada.

Para o exemplo de análise combinada foi utilizado os Quadros 08 e 10, onde se considera o valor da análise do fator de β e o valor da depreciação econômica.

Considera-se também o custo do ativo novo **CAn**, e o valor do **CuMc** que é custo de manutenção corretiva (rebobinamento do motor), sendo estes valores detalhados no Quadros 08 e 10. Estes valores correspondem a data base de pesquisa do ano de 2011.

O valor do custo total unitário da manutenção corretiva, preventiva e preditiva **CTuMCP**, é determinado como sendo o custo de uma manutenção corretiva mais os custos de manutenção preventiva e preditiva por ano.

Depois de realizadas as etapas de análise descritas acima, são definidas o critério que conjugue os itens já mencionados. Dois critérios de análise são apresentados:

Critério 1 - (Estratégia de Manutenção Técnica e Econômica em relação à Depreciação do Equipamento). Esta prescrição do critério leva em consideração os seguintes itens:

Se $\beta > 1$, equipamento em fase de falhas Fim Vida Útil;

Se **DE = 0**, depreciação econômica do equipamento igual a zero, equipamento com mais de 10 anos de vida útil;

Se a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil for maior que 100% do custo ativo depreciado. Assim, o motor pode ser considerado como item depreciado tecnicamente e economicamente, e a prescrição pode ser escolhida escolher entre:

a – Descartar o MOTOR;

b – Substituir o MOTOR por um novo item.

A maneira de exemplo é apresentada a análise de um motor com potência de 0,18 kW (motor de número registro 971). Este motor teve um total de quatro falhas durante o período do ano de 1991 até o ano de 2010, registrados em seus históricos de manutenção.

O valor Beta é analisado usando a planilha em Excel e o *software* da curva de Weibull. O número de dias em que o motor ficou em funcionamento após ter passado pelas três falhas e por três manutenções corretivas durante o período de análise dos históricos de manutenção, é indicado na coluna 1 do Quadro 7.

Tempo até Falha (dias)	Eventos	MR (Média Rank)	1/(1-MR)	ln(ln(1/(1-MR)))	ln(Tempo até a Falha)
70	1	0,159090909	1,189189189	-1,752894273	4,248495242
107	2	0,386363636	1,62962963	-0,716717249	4,672828834
274	3	0,613636364	2,588235294	-0,050266149	5,613128106
384	4	0,840909091	6,285714286	0,608830072	5,950642553
Beta					1,231900455

Quadro 7 - Cálculo do valor de beta através do uso do software Excell
Fonte: Adaptado de Dorner (1999)

Como se observa no quadro 07, este motor ficou em operação durante 70 dias e sofreu sua primeira falha, depois ficou em operação durante 107 dias e sofreu sua segunda falha, depois ficou em operação durante 274 dias e sofreu sua terceira falha e por último ficou em operação durante 384 dias, o resultado é um valor de Beta=1,23 ($\beta > 1$).

A análise do valor de beta simulando os dados de falhas no *software* de Weibull (Weibull ++ 7 ®) é ilustrada na Figura 17.

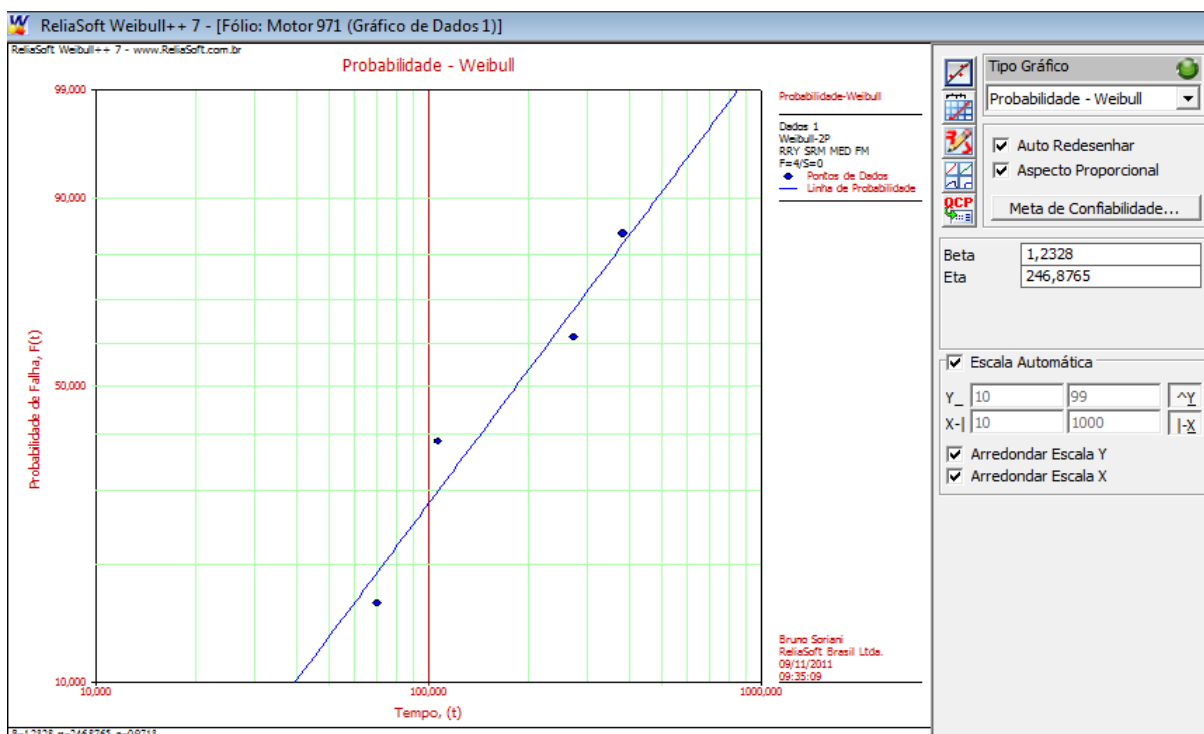


Figura 17 - Papel de probabilidade de Weibull para dados de falhas ocorridas no bobinado do motor elétrico n° 971
Fonte: O autor

No Quadro 8 são relatados os resultados da análise combinada da depreciação técnica e da depreciação econômica, resultando na prescrição do critério a ser adotado na estratégia de manutenção.

Análise Combinada	Resultados
$\beta > 1$	Sim
DE - Depreciação Econômica	>10 anos
CAn - Custo Ativo (Motor Novo)	R\$ 352,41
CTuMCP - Custo Total Manutenção Corretiva, Preventiva e Preditiva	R\$ 240,75
CTuMCP > 100 % CAdep	Sim

Quadro 8 - Análise combinada dos históricos de manutenção do motor de nº 971

Da conjugação dos resultados acima a prescrição do critério de manutenção é detalhado e justificado abaixo.

O motor já está depreciado contabilmente $DE = 0$, pois o mesmo possui uma vida útil maior que 10 anos. Sendo que a relação do $CTuMCP > 100\% CAdep$, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior que 100% do custo do ativo depreciado.

Como o valor do fator de forma de Weibull resultou em $\beta > 1$, e o resultado da relação do $CTuMCP > 100\% CAdep$, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

Critério 2 - (Estratégia de Manutenção Técnica e Econômica).

Esta prescrição do critério 2, leva em consideração os seguintes itens:

Se $\beta < 1$, equipamento em fase de Falhas Prematuras;

Se $DE \neq 0$, depreciação econômica do equipamento diferente de zero, equipamento com menos de 10 anos de vida útil;

Se a relação do $CTuMCP < 100\% CAdep$, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento for menor que 100% do custo ativo depreciado.

Assim, o motor pode ser considerado como item não depreciado tecnicamente e economicamente, podendo escolher uma das seguintes estratégias de manutenção:

a – Manutenção corretiva;

- b – Análise de erros de projeto;
- c – Análise de defeitos de instalação;
- b – Análise de erros de aplicação;

A seguir é apresentada a análise do equipamento (motor de número registro 969) motor de potência de 0,25kW, teve em seus históricos de manutenção registrados um total de três falhas durante o período do ano de 2007 até o ano de 2010.

O valor Beta é analisando abaixo usando a planilha em Excel e o *software* de Weibull da Reliasoft, conforme descrito abaixo.

Por exemplo, para o caso do motor com registro 969 e potência de 0,25 kW, o número de dias em que este motor ficou em funcionamento após ter passado pelas três falhas e por três manutenções corretivas durante o período de análise dos históricos de manutenção é indicado na coluna 1 do Quadro 9. Este motor ficou em operação durante 98 dias antes de sofrer a sua primeira falha, depois ficou em operação durante 473 dias e sofreu sua segunda falha e, por último, ficou em operação durante 790 dias. O resultado é um valor de Beta=0,87 ($\beta < 1$).

Tempo até Falha	Eventos	MR (Média Rank)	1/(1-MR)	ln(ln(1/(1-MR)))	ln(Tempo até a Falha)
98	1	0,205882	1,259259	-1,4674	4,584967
473	2	0,5	2	-0,36651	6,159095
790	3	0,794118	4,857143	0,45771	6,672033

Beta	0,8699
------	--------

Quadro 9 - Análise do valor de beta utilizando a planilha de cálculo do Excel

Fonte: O autor

A análise do valor de beta simulando os dados de falhas no *software* de Weibull (Weibull ++ 7 ®) é ilustrada na Figura 18.

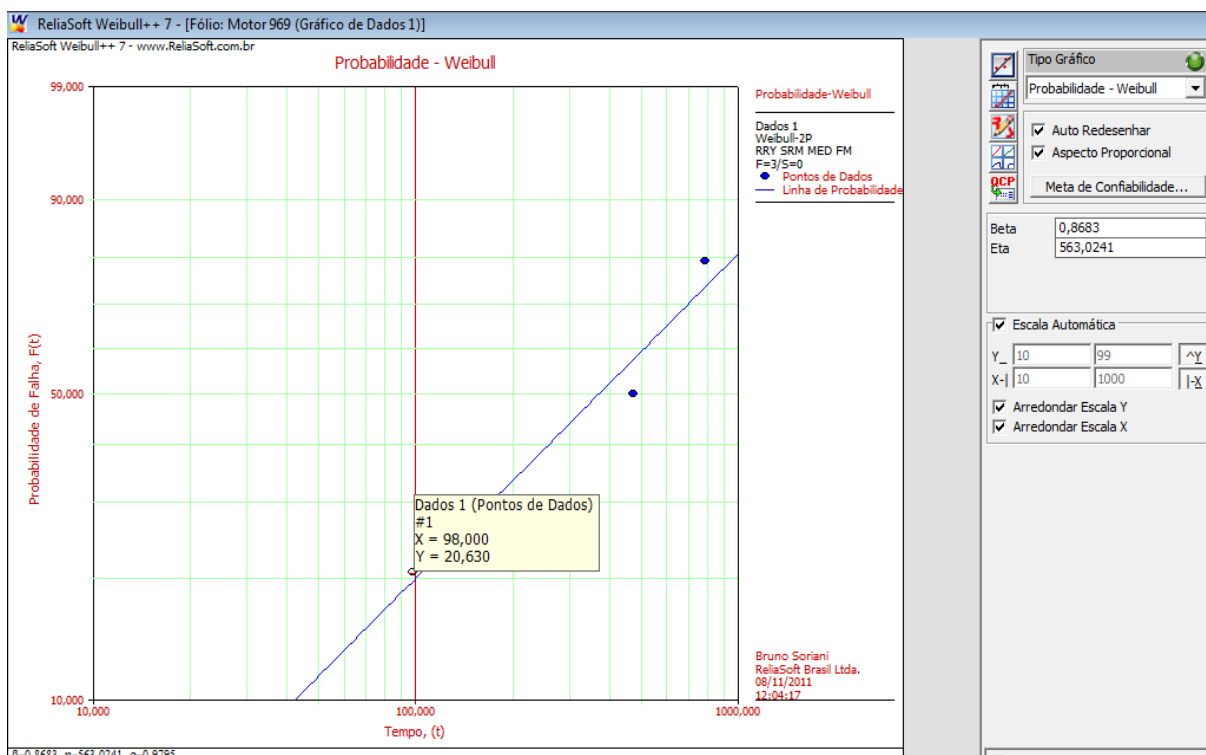


Figura 18 - Papel de probabilidade de Weibull para dados de falhas ocorridas no bobinado do motor elétrico n° 969
Fonte: O autor

No Quadro 10 são relatados os resultados da análise combinada da depreciação técnica e depreciação econômica, obtendo-se o critério a ser adotado na estratégia de manutenção.

Análise Combinada	Resultados
$\beta < 1$	Sim
DE - Depreciação Econômica	< 10 anos
CAn - Custo Ativo (Motor Novo)	R\$ 352,41
CTuMCP - Custo Total Manutenção Corretiva, Preventiva e Preditiva	R\$ 245,75
CTuMCP > 100 % CADep	Não

Quadro 10 - Resultados da análise combinada do motor com código 969
Fonte: O autor

O motor de código 969 teve, em seus históricos de manutenção, registrados um total de uma falha durante o período do ano de 2007 até o ano de 2010.

Como se observa, o motor não está depreciado contabilmente, pois o mesmo possui uma vida útil menor do que 4 anos, e o custo deste motor a ser adquirido como ativo novo é de R\$ 381,56. O motor não está depreciado contabilmente $DE \neq 0$, pois o mesmo possui uma vida útil menor do que 10 anos.

Sendo que a relação do **CTuMCP** < 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é menor do que 100% do custo do ativo depreciado.

Como o valor do fator de forma de Weibull resultou em $\beta < 1$, e o resultado do **CTuMCP** < 100 % **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 2 já descrito.

- a – Manutenção corretiva;
- b – Análise de erros de projeto;
- c – Análise de defeitos de instalação;
- b – Análise de erros de aplicação;

Critério 3 - (Estratégia de Manutenção Técnica).

Esta prescrição do critério 3, leva em consideração os seguintes itens:

Se $\beta < 1$, equipamento em fase de Falhas Prematuras;

Se **DE = 0**, depreciação econômica do equipamento igual a zero, equipamento com mais de 10 anos de vida útil;

Se a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento for maior que 100% do custo ativo depreciado.

Assim, o motor pode ser considerado como item depreciado economicamente, onde a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o critério 3, descrito acima.

- a – Análise de erros de projeto;
- b – Análise de defeitos de instalação;
- c – Análise de erros de aplicação;
- d – Substituir o motor por um novo;

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS COLETADOS

A partir dos resultados obtidos foi realizada uma análise estatística que teve o propósito de determinar a existência de correlações entre as variáveis de estudo, conforme ilustrado no Quadro 11. Para isto, os motores foram divididos em 7 grupos,

representando uma amostra total de 28 motores, na faixa de potência de 0,28 kW até 150 kW.

Motores Selecionados x Grupo de Motores			
Potência (kW)	Valor Beta - β (Distribuição Weibull)	NMc - Número de Manutenção Corretivas	CTuMCP - Custo Total Manutenção Corretiva, Preventiva e Preditiva

Quadro 11 - Grupo de variáveis para análise de correlação estatística

Fonte: O autor

O valor de Beta, resultados da análise dos 28 motores, é uma variável dependente das falhas ocorridas em cada motor e sua ordem de valor é aleatória, sendo que o valor mínimo de Beta é de 0,48 e o valor máximo de Beta é de 1,93, que são os válidos para o conjunto de motores objeto deste estudo.

Um total de 123 manutenções corretivas foi efetuado nos 7 grupos de motores, onde o número mínimo de manutenção corretiva foi de 3 e, o máximo, de 10.

Em relação ao custo de manutenção corretiva, a análise de correlação foi organizada na ordem crescente, pois a mesma está relacionada com a potência do motor. Assim, o valor mínimo do custo de manutenção corretiva foi de R\$ 525,00, e o valor máximo do custo de manutenção corretiva, de R\$ 33.600,00.

Na análise de correlação entre as variáveis do Quadro 11, foi utilizado o *software* Excel e a sua ferramenta “Análise de Dados e Correlação”. O resultado da análise estatística da correlação entre as variáveis foi organizado conforme o Quadro 12, onde os valores indicados dentro das células representam o coeficiente de correlação (r).

Variável para análise de Correlações	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β (Distribuição Weibull)	NMc	CTuMCP
Potência (kW)				
Valor Beta - β (Distribuição Weibull)				
NMc - Número de Manutenção Corretivas				
CTuMCP - Custo Total Manutenção Corretiva, Preventiva e Preditiva				

Quadro 12 – Resultado das correlações entre as variáveis, usando o software Excel

Fonte: O autor

O coeficiente de correlação determina o grau de associação entre as duas variáveis. O valor de (r) pode variar entre os máximos de -1 a +1, com o sinal (+ ou

-) indicando o sentido da correlação. No caso de r com valor igual a zero, haverá independência entre as variáveis, isto é, não existirá correlação.

Após a análise de correlação dos resultados, efetua-se o teste de significância estatística das correlações. A hipótese é testada por:

$$t = \frac{r - \rho}{s_r}$$

onde:

$\rho = 0$, e s_r é o erro padrão do coeficiente de correlação, sendo calculado por:

$$s_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}$$

A hipótese é rejeitada quando o valor de t calculado for maior que t fornecido na tabela da distribuição *t-student* para α especificado e $n-2$ graus de liberdade, sendo n o número de pares de amostra. Sendo assim, a associação entre as variáveis não é estatisticamente significativa, caso contrário, é estatisticamente significativa. O valor de t na tabela da distribuição *t-student* para $\alpha = 95\%$, é igual á 2,06.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na aplicação da análise depreciativa técnico-econômica dos motores elétricos estudados. Incluem-se, portanto, os resultados referentes aos 31 motores selecionados em relação ao procedimento metodológico adotado, bem como os resultados das correlações entre as variáveis de interesse.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL EM RELAÇÃO À ANÁLISE COMBINADA

No Quadro 13 apresentam-se os resultados da análise da distribuição de Weibull para os 31 motores, relacionando o valor do fator de forma, a potência de cada motor e o critério de manutenção adotado.

Motores Selecionados para Análise – Critério de Manutenção			
Motor Número (Tag do Motor)	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β (Distribuição Weibull)	Prescrição Critério Manutenção.
783	0,18kW/0,25CV	0,66	3
1042	0,18kW/0,25CV	1,93	1
968	0,25kW/0,33CV	0,75	3
965	0,25kW/0,33CV	0,87	3
970	0,25kW/0,33CV	1,12	1
971	0,25kW/0,33CV	1,23	1
975	0,25kW/0,33CV	1,38	1
979	0,25kW/0,33CV	0,94	3
997	0,25kW/0,33CV	1,14	1
1005	0,25kW/0,33CV	1,16	1
1006	0,25kW/0,33CV	0,56	3
1609	0,25kW/0,33CV	1,22	1
1437	0,37kW/0,5CV	1,18	1
1438	0,37kW/0,5CV	1,25	1
1451	0,37kW/0,5CV	0,71	3
1452	0,37kW/0,5CV	0,77	3
1462	0,37kW/0,5CV	1,15	1
1466	0,37kW/0,5CV	1,20	1
1467	0,37kW/0,5CV	1,79	1
1059	0,75kW/1CV	0,83	3
549	5,5kW/7,5CV	0,92	3

1615	5,5kW/7,5CV	1,02	1
1080	18kW/25CV	0,82	3
131	55kW/75CV	0,57	3
178	55kW/75CV	0,58	3
117	93kW/125CV	0,71	3
121	93kW/125CV	0,48	3
78	150kW/200CV	1,04	1
79	150kW/200CV	0,90	3
80	150kW/200CV	0,51	3
1075	186kW/250CV	0,55	3

Quadro 13 - Resultados da análise combinada para os 31 motores objeto de estudo
Fonte: O autor

O resultado da análise combinada dos 31 motores é detalhado no gráfico da Figura 19, onde um total de 14 motores tiveram um valor de $\beta > 1$, e um total de 17 motores tiveram valores de $\beta < 1$.

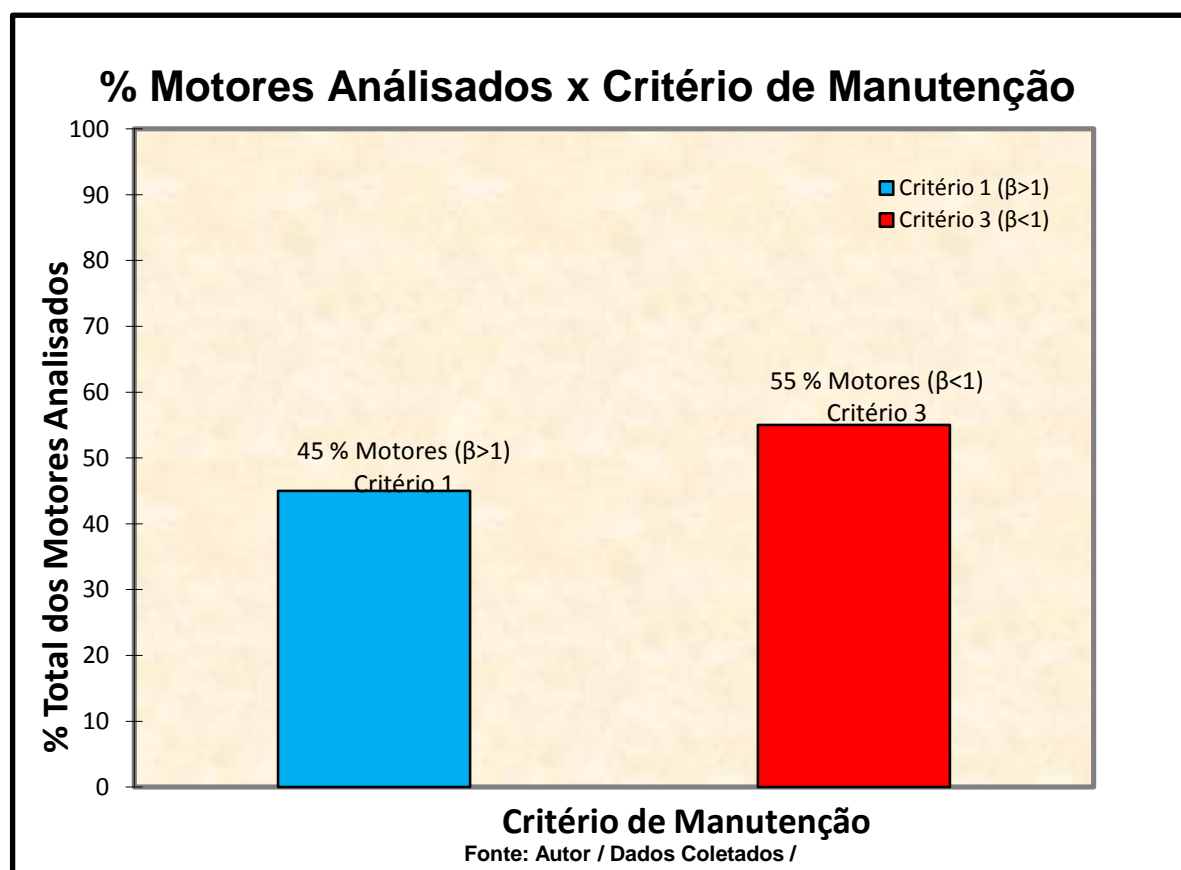


Figura 19 - % de motores em relação ao critério de manutenção adotado para os 31 motores analisados no estudo
Fonte: O autor

Por outro lado, o custo total da manutenção corretiva, preventiva e preditiva executada nos motores, devido às falhas ocorridas em cada motor durante o período de análise dos históricos de manutenção, é apresentado no Quadro 14, em relação ao custo do ativo novo.

Motores Selecionados para Análise							
Motor N° (Tag do Motor)	Potência (kW/CV)	Valor Beta β	NMc	CAn	CuMc	CTuMCP	% CTuMCP > 100% CADep
783	0,18kW/0,25CV	0,66	3	R\$ 352,41	R\$ 175,00	R\$ 240,75	SIM
1042	0,18kW/0,25CV	1,93	3	R\$ 352,41	R\$ 175,00	R\$ 240,75	SIM
968	0,25kW/0,33CV	0,75	8	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
965	0,25kW/0,33CV	0,87	3	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
970	0,25kW/0,33CV	1,12	3	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
971	0,25kW/0,33CV	1,23	4	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
975	0,25kW/0,33CV	1,38	10	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
979	0,25kW/0,33CV	0,94	5	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
997	0,25kW/0,33CV	1,14	4	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
1005	0,25kW/0,33CV	1,16	4	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
1006	0,25kW/0,33CV	0,56	6	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
1609	0,25kW/0,33CV	1,22	3	R\$ 381,56	R\$ 180,00	R\$ 245,75	SIM
1437	0,37kW/0,5CV	1,18	6	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1438	0,37kW/0,5CV	1,25	5	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1451	0,37kW/0,5CV	0,71	3	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1452	0,37kW/0,5CV	0,77	5	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1462	0,37kW/0,5CV	1,15	5	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1466	0,37kW/0,5CV	1,20	4	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1467	0,37kW/0,5CV	1,79	5	R\$ 410,69	R\$ 202,00	R\$ 267,75	SIM
1059	0,75kW/1CV	0,83	3	R\$ 475,39	R\$ 220,00	R\$ 285,75	SIM
549	5,5kW/7,5CV	0,92	5	R\$ 1.267,66	R\$ 580,00	R\$ 645,75	SIM
1615	5,5kW/7,5CV	1,02	3	R\$ 1.267,66	R\$ 580,00	R\$ 645,75	SIM
1080	18kW/25CV	0,82	8	R\$ 4.050,00	R\$ 1.800,00	R\$ 1.805,75	SIM
131	55kW/75CV	0,57	4	R\$ 8.769,53	R\$ 3.600,00	R\$ 3.665,75	SIM
178	55kW/75CV	0,58	4	R\$ 8.769,53	R\$ 3.600,00	R\$ 3.665,75	SIM
117	93kW/125CV	0,71	4	R\$ 15.159,07	R\$ 5.800,00	R\$ 5.865,75	SIM
121	93kW/125CV	0,48	3	R\$ 15.159,07	R\$ 5.800,00	R\$ 5.865,75	SIM
78	150kW/200CV	1,04	3	R\$ 20.961,18	R\$ 8.400,00	R\$ 8.465,75	SIM

79	150kW/200CV	0,90	4	R\$ 20.961,18	R\$ 8.400,00	R\$ 8.465,75	SIM
80	150kW/200CV	0,51	4	R\$ 20.961,18	R\$ 8.400,00	R\$ 8.465,75	SIM
1075	186kW/250CV	0,55	3	R\$ 24.662,93	R\$ 10.990,00	R\$ 11.055,75	SIM

Quadro 14 - Resultados da análise da distribuição de Weibull para os 31 motores objeto de estudo

Fonte: O autor

Na figura 20 abaixo é apresentado o **CTuMCP**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva em relação ao **CADep**, custo do ativo depreciado em cada ano na faixa de potência de 0,18 kW até 186 kW.

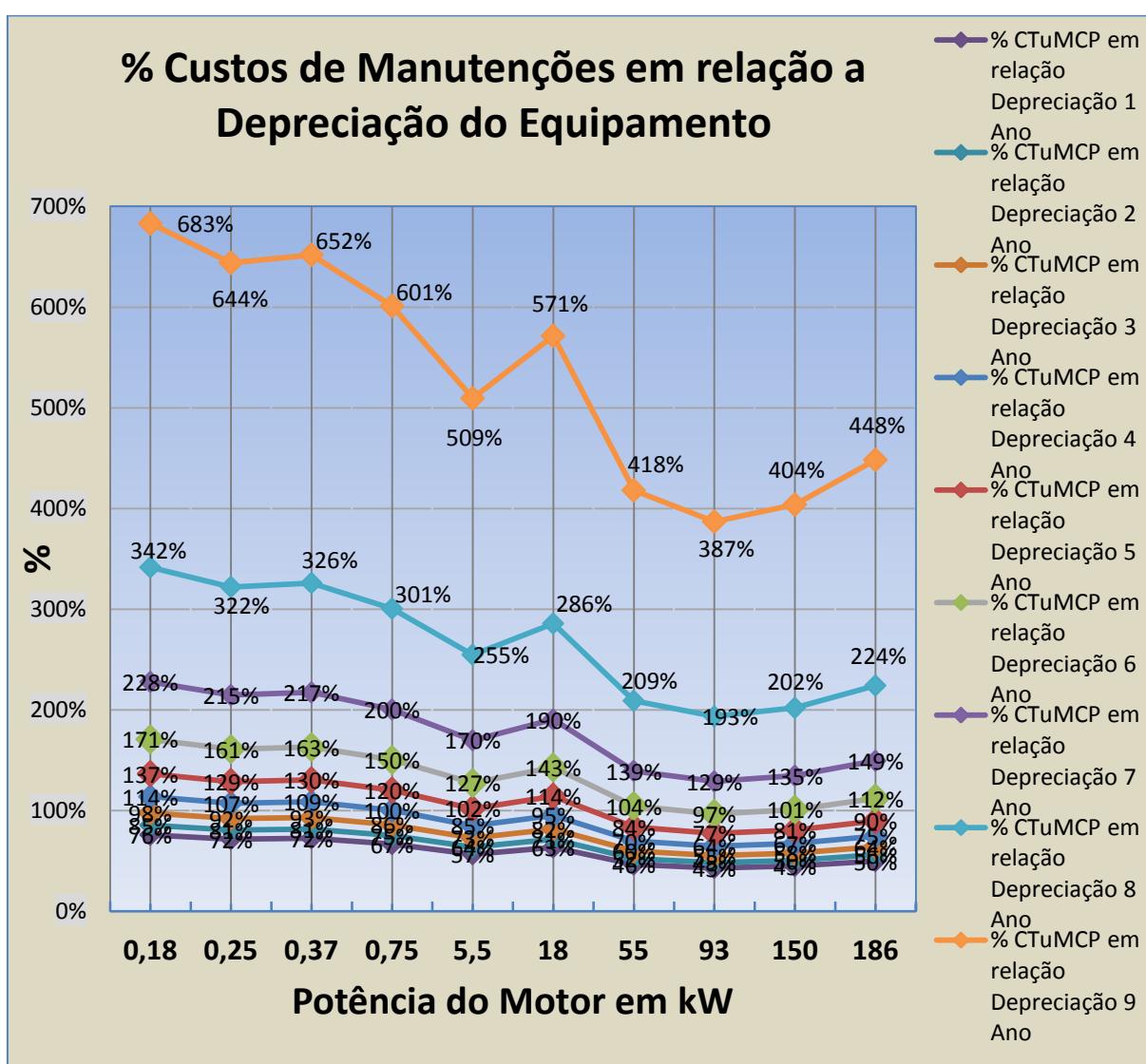


Figura 20 - Gráfico % de custo de manutenção em relação a depreciação do ativo por faixa de potência em kW.

Fonte: O autor

4.2 ANÁLISE DE RESULTADOS POR GRUPO DE MOTORES

O Quadro 15 apresenta o resultado da análise dos 31 motores divididos em 10 grupos. Esta divisão dos motores em grupos representa uma classificação por faixa de potência.

Motores Selecionados x Grupo de Motores			
Grupo de Motor	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	% CTuMCP em relação ao CADep – (Depreciação de 9 Anos)
A	0,18kW/0,25cv	0,66	683%
A	0,18kW/0,25cv	1,93	683%
B	0,25kW/0,33cv	0,75	644%
B	0,25kW/0,33CV	0,87	644%
B	0,25kW/0,33CV	1,12	644%
B	0,25kW/0,33CV	1,23	644%
B	0,25kW/0,33CV	1,38	644%
B	0,25kW/0,33CV	0,94	644%
B	0,25kW/0,33CV	1,14	644%
B	0,25kW/0,33CV	1,16	644%
B	0,25kW/0,33CV	0,56	644%
B	0,25kW/0,33CV	1,22	644%
C	0,37kW/0,5CV	1,18	652%
C	0,37kW/0,5CV	1,25	652%
C	0,37kW/0,5CV	0,71	652%
C	0,37kW/0,5CV	0,77	652%
C	0,37kW/0,5CV	1,15	652%
C	0,37kW/0,5CV	1,20	652%
C	0,37kW/0,5CV	1,79	652%
D	0,75kW/1CV	0,83	601%
E	5,5kW/7,5CV	0,92	601%
E	5,5kW/7,5CV	1,02	601%
F	18kW/25CV	0,82	509%
G	55kW/75CV	0,57	571%
G	55kW/75CV	0,58	571%
H	93kW/125cv	0,71	418%
H	93kW/125CV	0,48	418%
I	150kW/200CV	1,04	387%

I	150kW/200CV	0,90	387%
I	150kW/200CV	0,51	404%
J	186kW/250CV	0,55	448%

Quadro 15 - Grupo de motores em relação a análise da distribuição de Weibull para os 31 motores objeto de estudo

Fonte: O autor

Na Figura 21 apresenta-se a porcentagem do valor do fator de forma em relação ao número de motores de cada grupo ou faixa de potência.

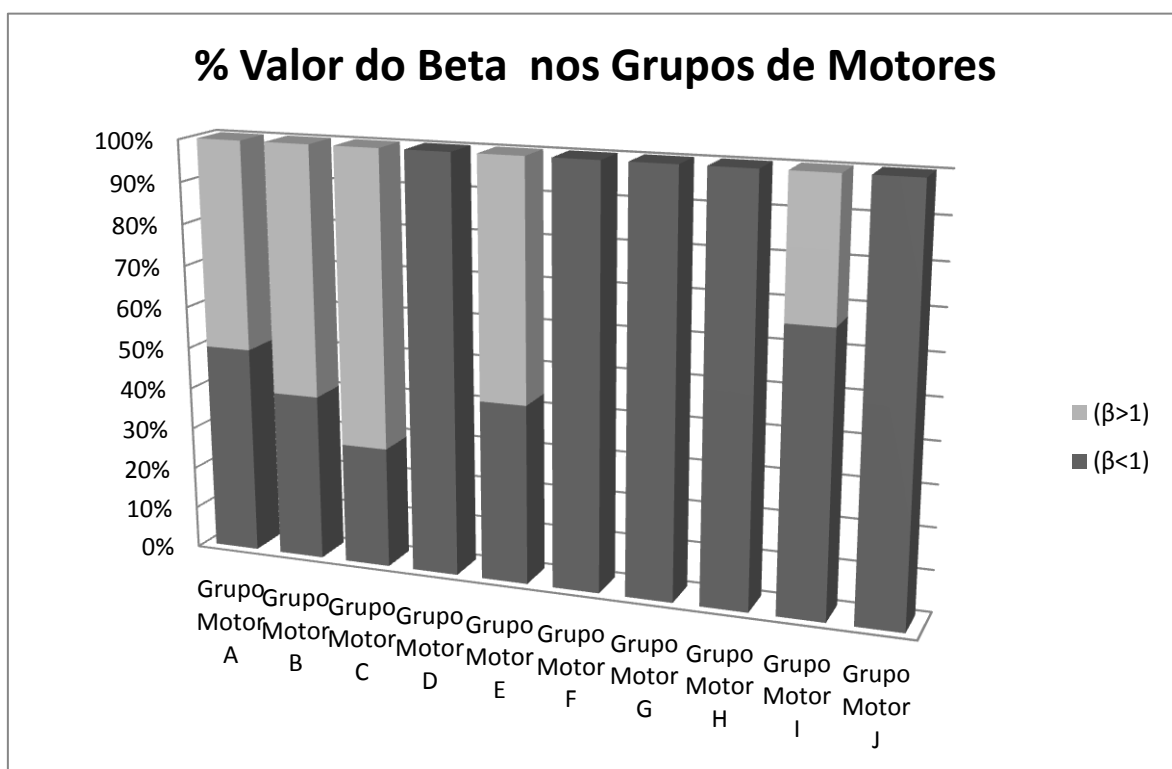


Figura 21 - Análise grupos de motores - % do valor de Beta em cada grupo de motores
Fonte: O autor

A figura anterior sugere que valores de fator de forma menores que 1 são ligeiramente predominantes nos grupos escolhidos. A seguir analisam-se os resultados para cada grupo de motor.

4.2.1 Análise de Resultados para o Grupo de Motores A

O grupo de motores A é caracterizado por dois motores com potência elétrica de 0,18 kW. O Quadro 16 apresenta a análise de falha destes dois itens, sugerindo resultados de valor de Beta diferente entre eles.

Grupo de Motores A							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
A	0,18kW/0,25CV	1,93	3	R\$ 352,41	R\$ 240,00	683%	1
A	0,18kW/0,25CV	0,66	3	R\$ 352,41	R\$ 240,00	683%	3

Quadro 16 - Grupo de motores A - Análise da distribuição de Weibull x Análise combinada
Fonte: O autor

Na Figura 22 apresenta-se a análise combinada para este grupo de motor, na qual, o critério de manutenção corresponde ao “critério 1” para o motor que obteve um valor de $\beta > 1$, e o critério 3, para o motor que obteve um valor de $\beta < 1$.

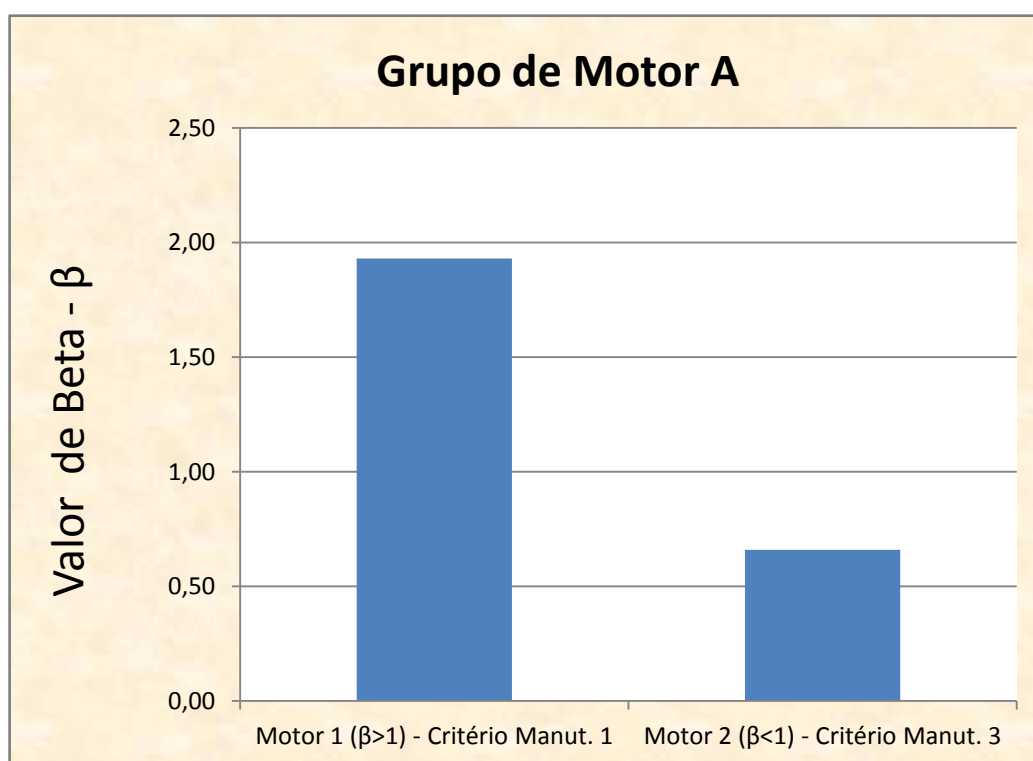


Figura 22 - Análise grupo do motor A - critério de manutenção adotado
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo A tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** $>$ 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** $>$ 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da $CTuMCP > 100\% CA_{Dep}$, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da $CTuMCP > 100\% CA_{Dep}$, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.2 Análise de Resultados para o Grupo de Motores B

O grupo de motores B é caracterizado por dez motores com potência elétrica de 0,25 kW. O Quadro 17 apresenta a análise de falha destes itens, sugerindo resultados de valor de Beta diferente entre eles.

Grupo de Motores B							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
B	0,25kW/0,33CV	1,12	3	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	1
B	0,25kW/0,33CV	1,23	4	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	1
B	0,25kW/0,33CV	1,38	10	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	1
B	0,25kW/0,33CV	1,14	4	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	1
B	0,25kW/0,33CV	1,16	4	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	1
B	0,25kW/0,33CV	1,22	3	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	1
B	0,25kW/0,33CV	0,75	8	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	3
B	0,25kW/0,33CV	0,87	3	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	3
B	0,25kW/0,33CV	0,94	5	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	3
B	0,25kW/0,33CV	0,56	6	R\$ 381,56	R\$ 240,75	644%	3

Quadro 17 - Grupo de motores B - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Na Figura 23 apresenta-se o grupo de motores B, no qual a prescrição de estratégia de manutenção é que se adote o critério 1 de manutenção para os motores que obtiveram um valor do fator de forma de Weibull de $\beta > 1$. A prescrição da estratégia de manutenção é que se adote o critério 3 de manutenção para os motores que obtiveram um valor do fator de forma de Weibull de $\beta < 1$.

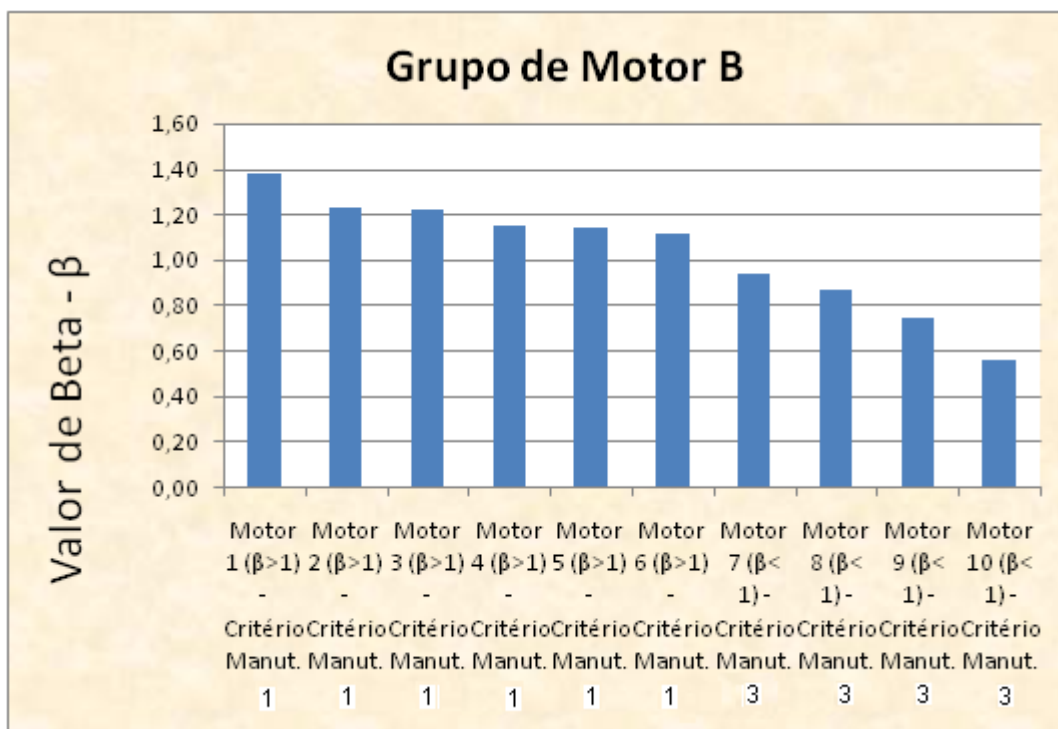


Figura 23 - Análise grupo do motor B - critério de manutenção adotado
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo B tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

E os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.3 Análise de Resultados Grupo de Motores C

O grupo de motores C é caracterizado por sete motores com potência elétrica de 0,37 kW. O Quadro 18 apresenta a análise de falha destes itens, sugerindo resultados de valor de Beta diferente entre eles.

Motores Seleccionados - Grupo de Motor C							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
C	0,37kW/0,5CV	1,79	5	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	1
C	0,37kW/0,5CV	1,25	5	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	1
C	0,37kW/0,5CV	1,20	4	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	1
C	0,37kW/0,5CV	1,18	6	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	1
C	0,37kW/0,5CV	1,15	5	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	1
C	0,37kW/0,5CV	0,77	5	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	3
C	0,37kW/0,5CV	0,71	3	R\$ 410,69	R\$ 667,75	652%	3

Quadro 18 - Grupo de Motores C - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Na Figura 24 apresenta-se o grupo de motores C, no qual se adota o critério 1 de manutenção para os motores que obtiveram um valor de $\beta > 1$, e o critério 2 aos motores que obtiveram um valor de $\beta < 1$.

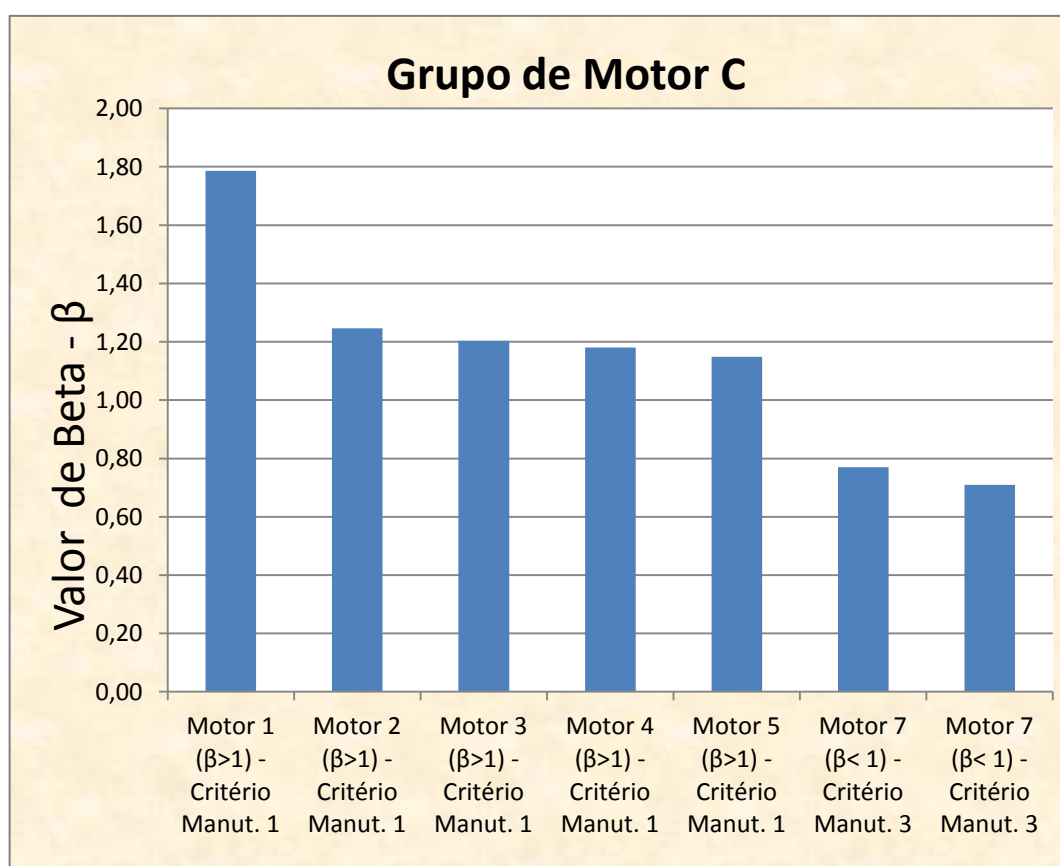


Figura 20 - Grupo de motores C - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Todos os motores do grupo C tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

E os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.4 Análise de Resultados para o Grupo de Motores D

O grupo de motores D é caracterizado por apenas um motor com potência de 0,75 kW, conforme ilustrado no Quadro 19.

Motores Selecionados - Grupo de Motor D							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
D	0,75kW/1CV	0,83	3	R\$ 475,39	R\$ 285,75	601%	3

Quadro 19 - Grupo de motores D - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Na Figura 25 é apresentado o grupo de motores D, onde a análise de falha obteve um valor de $\beta < 1$, optando-se pelo critério 2 de manutenção para este motor.

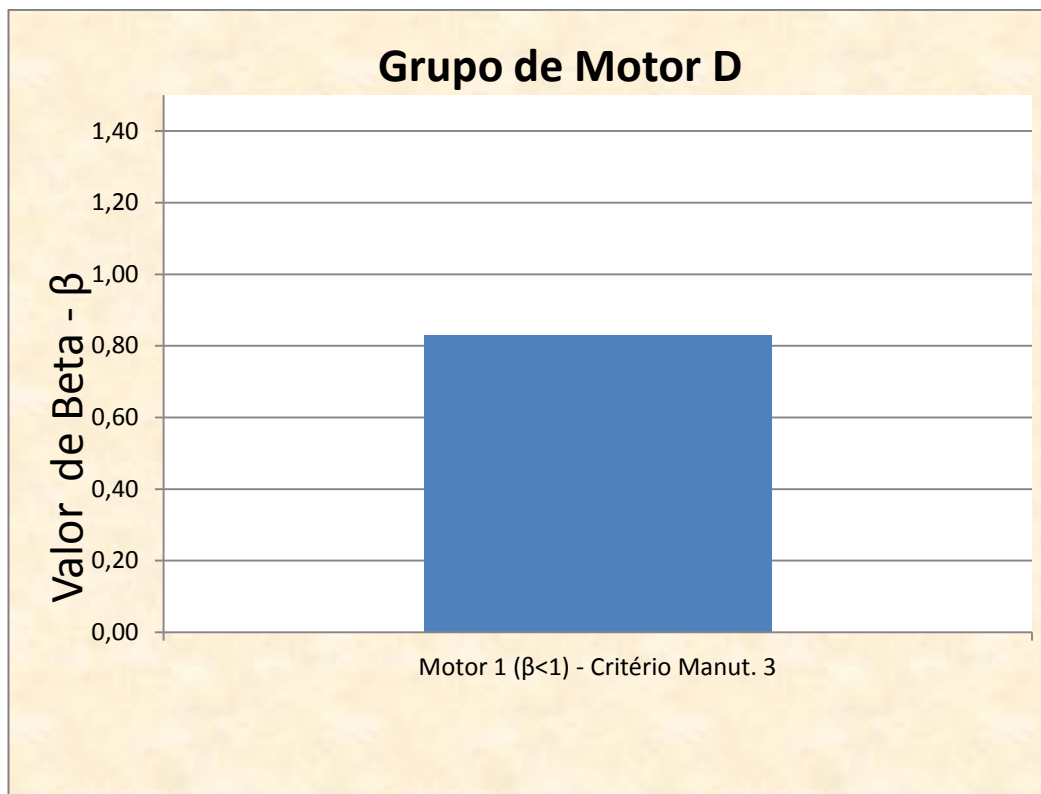


Figura 21 - Grupo de motores D - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo D tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.5 Análise de Resultados para o Grupo de Motores E

O grupo de motores E é caracterizado por dois motores de potência de 5,5 kW, com a análise de falha destes dois itens resultando em um valor de Beta diferente entre eles.

Motores Selecionados - Grupo de Motor E							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
D	5,5kW/7,5CV	1,02	3	R\$ 1.267,66	R\$ 645,75	509%	3
D	5,5kW/7,5CV	0,92	5	R\$ 1.267,66	R\$ 645,75	509%	3

Quadro 20 - Grupo de motores E - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Na Figura 26 apresenta-se o grupo de motores E, no qual se adota o critério 1 de manutenção para os motores que obtiveram um valor de $\beta > 1$, e o critério 2 aos motores que obtiveram um valor de $\beta < 1$.

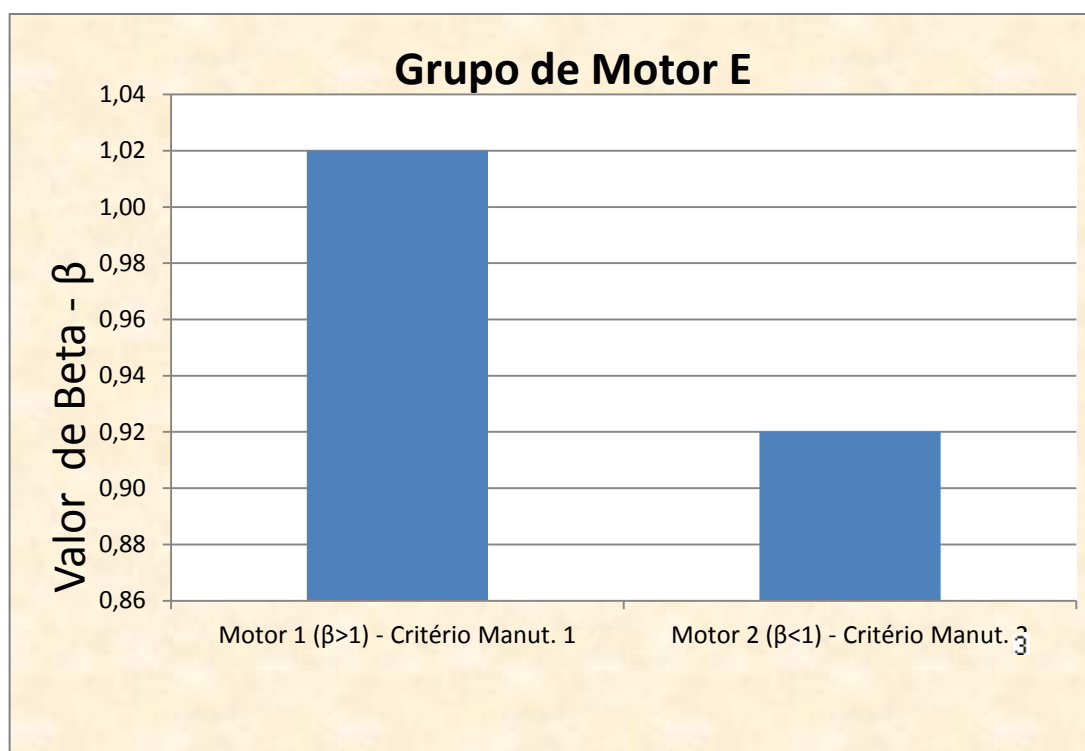


Figura 22 - Grupo de motores E - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo E tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep**.

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da **CTuMCP** $> 100\%$ **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

E os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** $> 100\%$ **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.6 Análise de Resultados para o Grupo de Motores F

O grupo de motores F é caracterizado por um motor de potência de 18 kW, conforme o Quadro 21.

Motores Selecionados - Grupo de Motor F							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutença o adotado
F	18kW/25CV	0,82	8	R\$ 3.160,15	R\$ 1805,75	571%	3

Quadro 21 - Grupo de motores F - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Na Figura 27 é apresentado o grupo de motores F, onde o critério de manutenção adotado para o motor foi o critério 2, com base na análise de falha que resultou em um valor de $\beta < 1$.

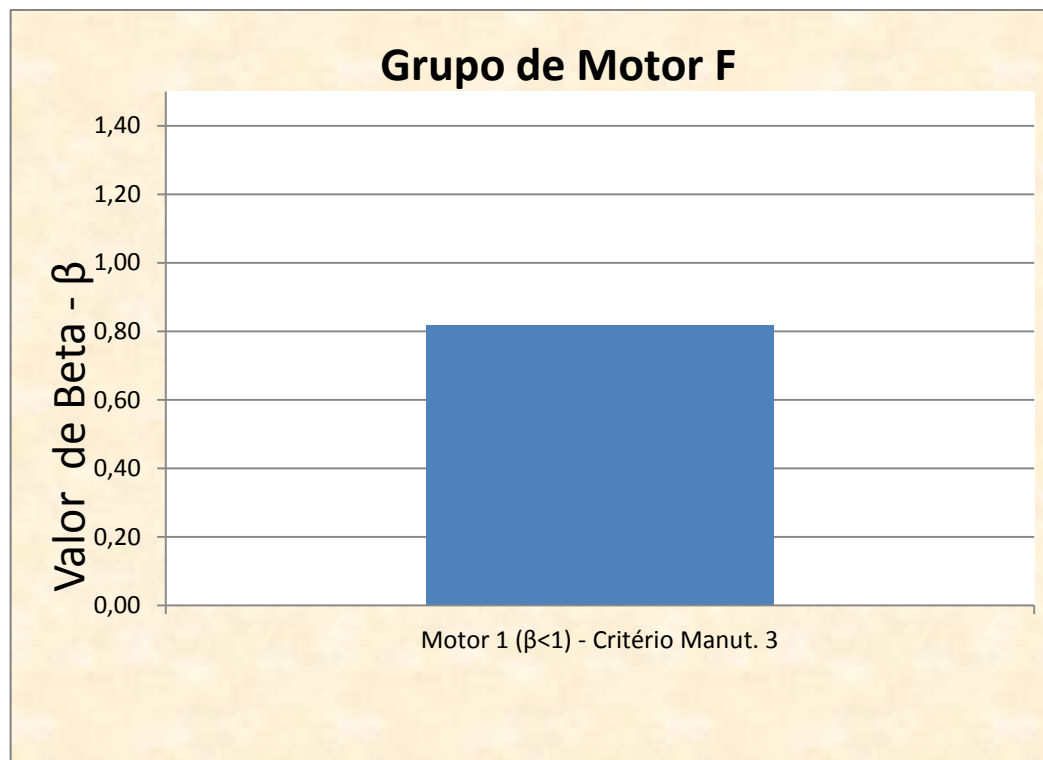


Figura 23 - Grupo de motores F - Análise da distribuição de Weibull x Análise Combinada
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo F tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP > 100 CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP > 100 % CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP > 100 % CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.7 Análise de Resultados para o Grupo de Motores G

O grupo de motores G é caracterizado por dois motores com potência elétrica de 55 kW, obtendo-se um valor de Beta similar entre eles.

Motores Selecionados - Grupo de Motor G							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
G	55kW/75CV	0,57	4	R\$ 8.769,53	R\$ 3.665,75	418%	3
G	55kW/75CV	0,58	4	R\$ 8.769,53	R\$ 3.665,75	418%	3

Quadro 22 - Grupo de motores G - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Na Figura 28 apresenta-se o grupo de motores G, no qual se adota o critério 1 de manutenção para os motores que obtiveram um valor de $\beta > 1$, e o critério 2 aos motores que obtiveram um valor de $\beta < 1$.

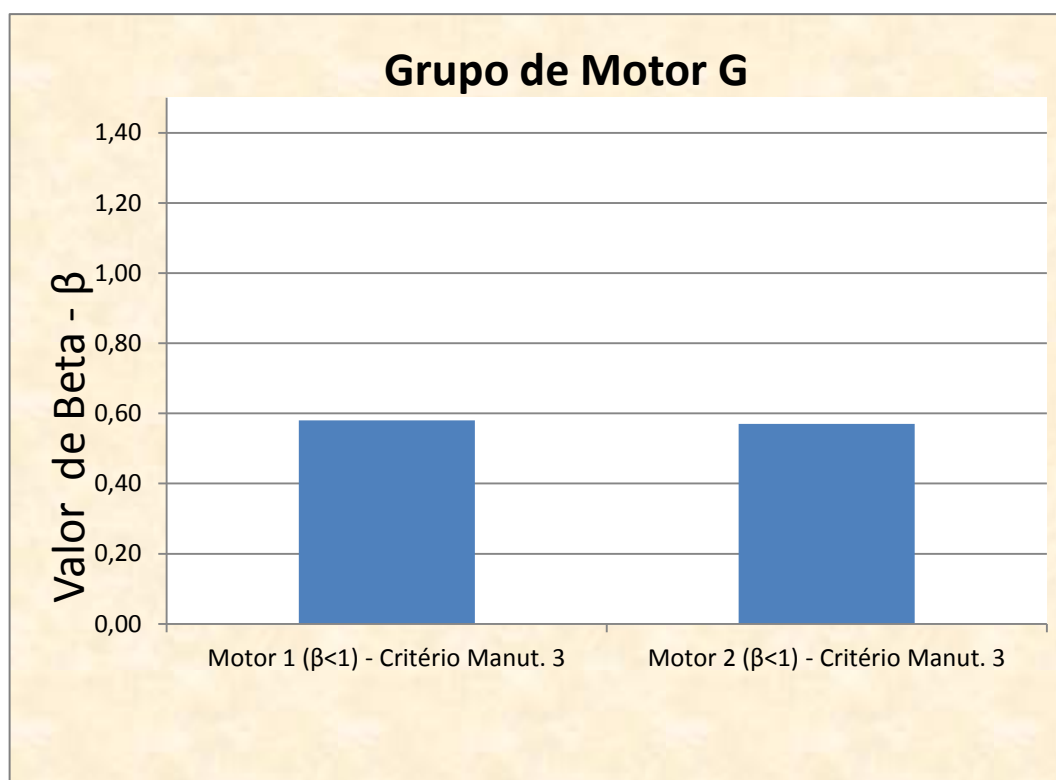


Figura 24 - Grupo de motores G - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo G tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** $>$ 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** $>$ 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da **CTuMCP** $> 100\%$ **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

E os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** $> 100\%$ **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.8 Análise de Resultados para o Grupo de Motores H

O grupo de motores H é caracterizado por dois motores com potência de 93 kW, como ilustrado no Quadro 23.

Motores Selecionados - Grupo de Motor H							
Grupo de Motores	Potência (KW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
H	93kW/125CV	0,71	4	R\$ 15.159,07	R\$ 5.865,75	387%	3
H	93kW/125CV	0,48	3	R\$ 15.159,07	R\$ 5.865,75	387%	3

Quadro 23 - Grupo de motores H - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Na Figura 29 apresenta-se o grupo de motores H, no qual se adota o critério 1 de manutenção para os motores que obtiveram um valor de $\beta > 1$, e o critério 2 aos motores que obtiveram um valor de $\beta < 1$.

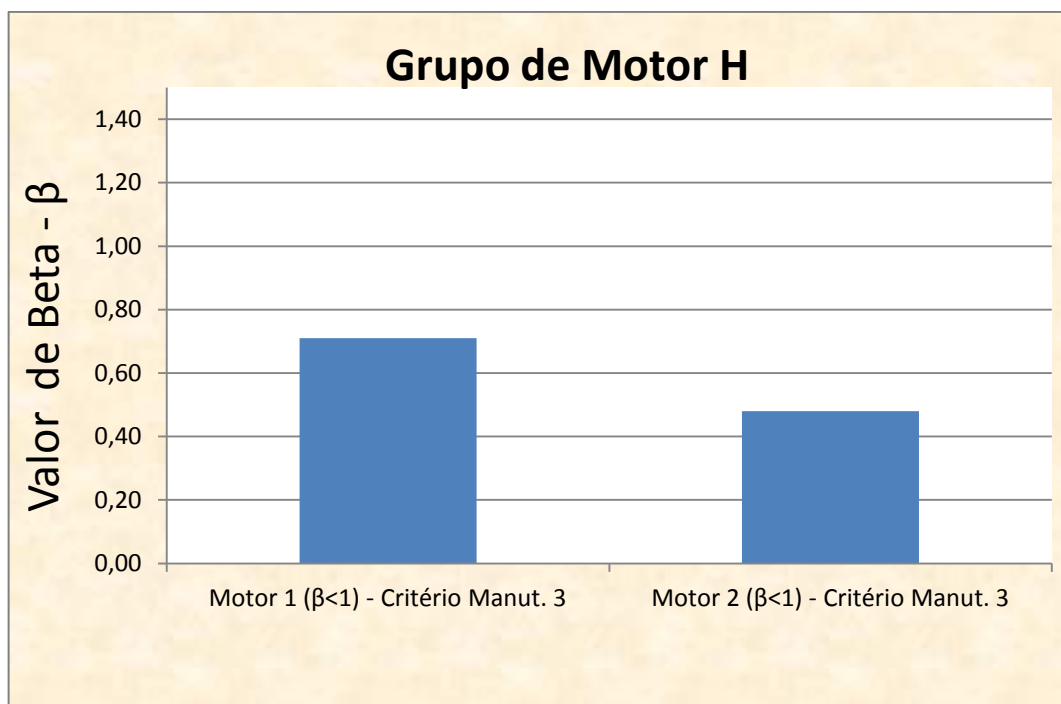


Figura 25 - Grupo de motores H - Análise da distribuição de Weibull
Fonte: O autor

Todos os motores do grupo H tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

E os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.9 Análise de Resultados Grupo de Motores I

O grupo de motores I é caracterizado por três motores com potência de 150 kW.

Motores Selecionados - Grupo de Motor I							
Grupo de Motores	Potência (KW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
I	150KW/200CV	1,04	3	R\$ 20.961,18	R\$ 8.465,75	404%	1
I	150KW/200CV	0,90	4	R\$ 20.961,18	R\$ 8.465,75	404%	3
I	150KW/200CV	0,51	4	R\$ 20.961,18	R\$ 8.465,75	404%	3

Quadro 24 - Grupo de Motores I - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Na Figura 30 apresenta-se o grupo de motores I, no qual se adota o critério 1 de manutenção para os motores que obtiveram um valor de $\beta > 1$, e o critério 2 aos motores que obtiveram um valor de $\beta < 1$.

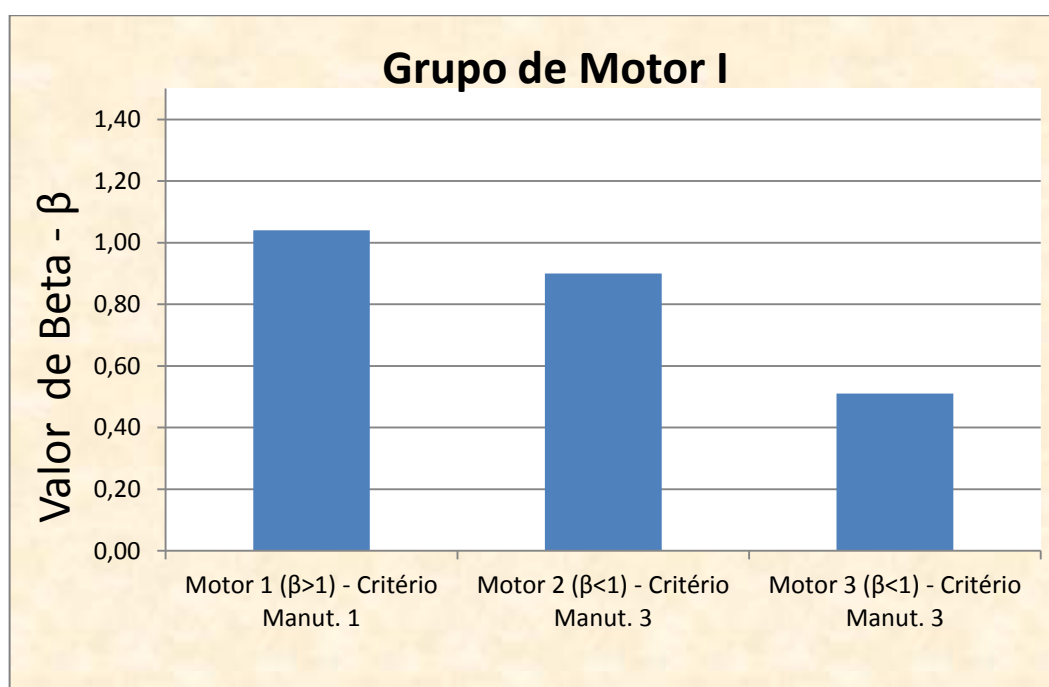


Figura 26 - Grupo de motores I - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Todos os motores do grupo I tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep**.

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Para os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta > 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 1 já descrito.

E os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** $> 100\%$ **CADep**, a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.2.10 Análise de Resultados para o Grupo de Motores J

O grupo de motores J é caracterizado por um motor de potência de 186 kW, conforme mostrado no Quadro 25.

Motores Selecionados - Grupo de Motor J							
Grupo de Motores	Potência (kW/CV)	Valor Beta - β	NMc	CAn	CTuMCP	% CTuMCP em relação Depreciação de 9 Anos	Prescrição Critério Manutenção adotado
J	186kW/250CV	0,55	3	R\$ 24.692,73	R\$ 11.055,75	448%	3

Quadro 25 - Grupo de motores J - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

A Figura 31 apresenta- o grupo de motores J, onde o critério adotado foi o critério 2 de manutenção para o motor, que obteve um valor de $\beta < 1$.

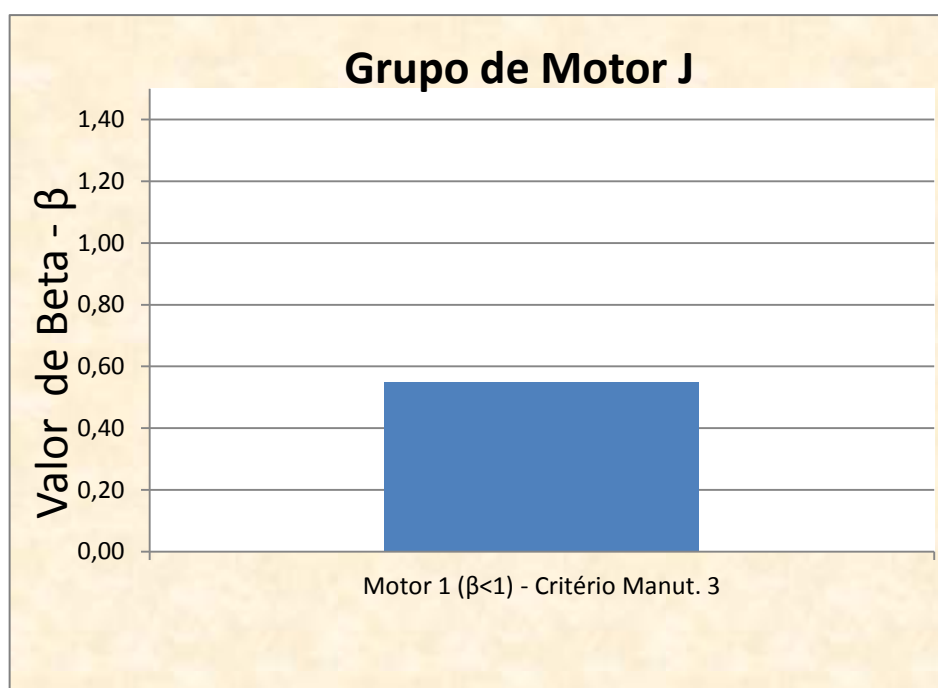


Figura 27 - Grupo de motores J - Análise da distribuição de Weibull

Fonte: O autor

Todos os motores do grupo J tiveram custo total de manutenção corretiva maior que o custo do ativo depreciado, pois a % do **CTuMCP** > 100 **CADep** .

Sendo que a relação do **CTuMCP** > 100 % **CADep**, custo total unitário de manutenção corretiva, preventiva e preditiva neste equipamento durante sua vida útil é maior do que 100% do custo do ativo depreciado.

Os motores que tiveram um valor do fator de forma de Weibull em $\beta < 1$, e o resultado da **CTuMCP** > 100 % **CADep** , a prescrição de estratégia de manutenção é que se aplique o Critério 3 já descrito.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DOS GRUPOS

A análise de correlação entre variáveis foi realizada considerando os seguintes parâmetros:

- Potência (kW);
- Valor Beta – β (Distribuição Weibull);
- NMc - Número de Manutenções Corretivas;
- CTuMCP - Custo total unitário da manutenção corretiva, preventiva e preditiva.

A análise estatística foi realizada somente para o total de 28 motores divididos em 7 grupos, uma vez que os grupos identificados como D, F e J, tinham somente um motor em cada um deles, não sendo possível a estimativa de um desvio padrão.

O Quadro 26 resume os valores da análise de correlação obtidos no *software* Excel na simulação entre as variáveis de interesse.

Variável das Correlações	Potência (kW)	Valor Beta - β (Distrib. Weibull).	NMc	CTuMCP
Potência (kW/CV)	1	-	-	-
Valor Beta - β (Distrib. Weibull)	-0,398	1	-	-
NMc – N° de Manut. Corretivas	-0,241	0,104	1,00	-
CTuMCP - Custo Total Manut. Corretiva, Preventiva e Preditiva	0,986	-0,427	-0,197	1

Quadro 26 – Coeficiente de correlação entre variáveis calculado no software Excel
Fonte: O autor

A análise das variáveis Potência (kW) e CTMc (Custo total de manutenção corretiva) obteve como resultado um coeficiente de correlação no valor de 0,986, indicando que estas duas variáveis são positivamente correlacionadas.

A análise da variável Potência (kW) em relação às variáveis β (Distrib. Weibull), e NMc (Número de Manutenção Corretiva), obteve coeficientes nos valores de -0,398 e -0,241 respectivamente, sugerindo uma correlação fraca e inversamente proporcional.

A análise da variável β (Distrib. Weibull) em relação à variável CTuMc (Custo total unitário de manutenção corretiva e preventiva), obteve como resultado um valor do coeficiente de correlação de -0,427, mostrando uma correlação fraca e inversamente proporcional.

A análise da variável β (Distrib. Weibull) em relação à variável NMc (Número de manutenção corretiva), obteve como resultado um valor de coeficiente de correlação de 0,104, sendo assim variáveis de correlação fraca e diretamente proporcionais.

A análise da variável NMc (Número de manutenção corretiva) em relação a variável CTuMc (Custo total unitário de manutenção corretiva e preventiva), obteve como resultado estatístico um valor -0,197, indicando uma correlação fraca e inversamente proporcional.

Os testes de significância estatística das correlações dos grupos do Quadro 26 mostram os seguintes resultados em relação às variáveis de estudo abaixo:

- Potência (kW) e Valor Beta - β (Distribuição Weibull);

O valor calculado de $t = -2,216 < 2,06$

O valor de t calculado é menor que t dado pela Tabela 1. Então a associação entre Potência (kW) e o Valor Beta β , não é estatisticamente significativa.

- Potência (kW) e NMc - Número de Manutenção Corretivas;

O valor calculado de $t = -1,27 < 2,06$

O valor de t calculado é menor que t dado pela Tabela 1, então a associação entre Potência (kW) e o Número de Manutenção Corretiva não é estatisticamente significativa.

- Potência (kW) e CTuMCP - Custo Total Manutenção Corretiva, preventiva e preditiva;

O valor calculado de $t = 30,09 > 2,06$.

O valor de t calculado é maior que t dado pela tabela, então a associação entre a Potência (kW) e CTuMCP é estatisticamente significativa.

- Valor Beta - β (Distribuição Weibull) e NMc - Número de Manutenção Corretivas;

O valor calculado de $t = 2,06 = 2,06$

O valor de t calculado é igual ao valor de t dado pela Tabela 1. Assim, a associação entre o Valor Beta β e o NMc, não é estatisticamente significativa.

- Valor Beta - β (Distribuição Weibull) e CTuMCP - Custo Total Manutenção corretiva, preventiva e preditiva;

O valor calculado de $t = -2,409 < 2,0$

O valor de t calculado é menor que t dado pela Tabela 1. Assim, a associação entre o Valor Beta β e o CTuMCP, não é estatisticamente significativa.

- NMc - Número de Manutenção Corretivas e CTuMCP - Custo Total Manutenção corretiva, preventiva e preditiva;

O valor calculado é $t = -1,0268 < 2,06$;

O valor de t calculado é menor que o t dado pela Tabela 1. Portanto, a associação entre NMc e o CTuMCP não é estatisticamente significativa.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos na aplicação da análise depreciativa técnico-econômica dos históricos de falha em motores elétricos.

Um total de 55% dos motores estudados nesta análise mostraram falhas do tipo prematuras ($\beta < 1$). Este tipo de falha é caracterizado pela literatura, na análise de Weibull em relação à curva da banheira, como falhas de mortalidade infantil, podendo estas ser ocasionadas por problemas de erro no tipo de aplicação, e defeito de fabricação, dentre outras.

O restante dos motores analisados, isto é, um total de 45% dos motores estudados teve “falhas do tipo fim de vida útil” ($\beta > 1$). Este tipo de falha é caracterizado pela literatura, na análise de Weibull em relação à curva da banheira, como falhas por deterioração, podendo estas ser ocasionadas pelo tempo de uso e desgaste dos materiais.

Os resultados mostraram que 45% dos motores tiveram uma manutenção eficiente, pois suas falhas foram caracterizadas como falhas por deterioração, ou seja, fim de vida útil. Apesar destas características, a análise estatística mostra que a relação entre o fator de forma com ambos parâmetros, o número de intervenções de manutenção e seus custos totais não é significativa.

A análise estatística das correlações entre a maioria das variáveis indica que as mesmas possuem uma correlação fraca e inversamente proporcional. A única correlação realmente forte e diretamente proporcional foi obtida entre as variáveis Potência (kW/CV) e CTuMCP - Custo total da manutenção corretiva, preventiva e preditiva como esperado, pois motores de maiores capacidades requerem maior investimento no reparo. A análise estatística mostrou significância na correlação existente entre as variáveis Potência (kW) e CTuMCP.

Para trabalhos futuros é pertinente avaliar os seguintes itens:

- O consumo de energia em relação à qualidade do reparo;
- A análise de eficiência energética de um motor reparado em relação ao de um motor novo.

REFERÊNCIAS

ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção). **A situação da manutenção no Brasil**: documento nacional 2009. Disponível em: <www.abraman.org.br>. Acesso em: 20 maio 2010.

_____. **A situação da manutenção no Brasil**: documento nacional 2011. Disponível em: <www.abraman.org.br>. Acesso em: 13 dez. 2011.

BONNETT, A. H.; SOUKUP, G. C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 28, n. 4, p. 921-937, jul./aug. 1992.

BRANCO FILHO, G. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

CENTENO, A. J. **Curso de estatística aplicada á biologia**. 2. ed. Goiânia: UFG, 1999.

CRUZ, S. M. A. **Diagnóstico e análise de avarias nos enrolamentos estatóricos dos motores de indução trifásico através da aplicação do método dos referenciais múltiplos**. Coimbra Portugal: 2004.

DODSON, B. **The Weibull Analysis Handbook**. 2. ed. United States of America: 2006.

DORNER, W. W. **Using Microsoft Excel for Weibull Analysis**. 1999. Disponível em: <http://www.qualitydigest.com/jan99/html/body_weibull.html>. Acesso em: 15 jan. 2012.

EASA (Electrical Apparatus Service Association). **The Effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency**. 2003.

FURMANN, J. C. **Desenvolvimento de um modelo para melhoria do processo de manutenção mediante a análise de desempenho de equipamentos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

KARDEC, A; NASCIF, J. **Manutenção função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark; Petrobras, 2009.

_____; FLORES, J.; SEIXAS, E. **Gestão Estratégica e Indicadores de Desempenho**. Rio de Janeiro: Qualitymark; Petrobras, 2002.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark; Petrobras. 2001.

LIRA, Luane; FERREIRA NETO, Marcos José; ARAÚJO, José Arnóbio Junior de; ARAÚJO, Aldayr Dantas Júnior de. **Estudo de melhoria de eficiência energética em uma instalação industrial: auditoria energética e análises econômicas**. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE E NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., Belém(PA), 2009. Anais... Belém (PA), 2009.

MOUBRAY, J. **RCM II: manutenção centrada em confiabilidade**. Grã-Bretanha: Biddles Ltda, Guilford and King's Lynn, 2000.

NEALE, M. J. **Lubrication and reliability handbook**. 2001.

SANTOS, C. **Depreciação de bens do ativo imobilizado**. São Paulo: IOB, 2008. (Coleção Prática IOB).

SOUZA, V. C. **Organização e gerência da manutenção**. 2. ed. São Paulo: All Print, 2007.

SELLITTO, M. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Revista Produção**, v. 15, n. 1, p. 44-59, jan./abr. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v15n1/n1a04.pdf>> Acesso em 16 mar. 2012.

WEG - Motores Elétricos de Corrente Alternada. **Manual do Fabricante WEG**. Disponível em <www.weg.com.br>. Acesso em: 20 mar. 2010.

APÊNDICE A - Tabela 1

Valores de t em níveis de 10% a 0,1% de probabilidade					
Grau de liberdade	10%	5%	2%	1%	0,1%
1	6,31	12,71	31,82	63,66	626,62
2	2,92	4,30	6,97	9,92	31,60
3	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
4	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
5	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
6	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
7	1,90	2,36	3,10	3,50	5,41
8	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
9	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
10	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
11	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
12	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
13	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
14	1,76	2,14	2,62	2,98	4,14
15	1,75	2,13	2,60	2,96	4,07
16	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
17	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
18	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
19	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
20	1,73	2,09	2,53	2,84	3,85
21	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
22	1,72	2,07	2,51	2,82	3,79
23	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
24	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75
25	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
26	1,71	2,06	2,48	2,78	3,71
27	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
28	1,70	2,05	2,47	2,76	3,67
29	1,70	2,04	2,46	2,76	3,66
30	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
40	1,68	2,02	2,42	2,70	3,50
60	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
120	1,65	1,98	2,36	2,62	3,37
	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29
Valores de t em níveis de 10% a 0,1% de probabilidade					

Tabela 1 - Valores de t em níveis de 10% a 0,1% de probabilidade
Fonte: Adaptado de Centeno (1999)