

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

DANILO FREIRES DO NASCIMENTO

**MANUTENÇÃO SOB CONDIÇÃO DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS
ESTACIONÁRIAS VENTILADAS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

SÃO PAULO
2016

DANILO FREIRES DO NASCIMENTO

**MANUTENÇÃO SOB CONDIÇÃO DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS
ESTACIONÁRIAS VENTILADAS**

Monografia de especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade – Área de concentração: Engenharia da Confiabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues.

SÃO PAULO
2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós Graduação - DIRPPG
Especialização em Engenharia de Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

MANUTENÇÃO SOB CONDIÇÃO DE BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS ESTACIONÁRIAS VENTILADAS

por

DANILO FREIRES DO NASCIMENTO

Esta Monografia foi apresentada em quinze de dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
UTFPR

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Aos meus pais, Genival Batista do Nascimento
e Maria de Fátima Freires do Nascimento.

À minha adorável esposa, Sandra Freires Araújo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade que me concede de realizar este curso e pelo caminho em que Ele tem conduzido a minha vida.

Ao Chefe de Departamento de Manutenção de Material Rodante do Metrô-SP, Antônio Márcio Barros Silva, pela confiança e viabilidade de subsídio deste curso, enquanto Chefe do Departamento Técnico de Manutenção.

Ao Supervisor de Manutenção do Monitoramento da Condição de Sistemas e Equipamentos do Metrô-SP, Luiz do Nascimento Pereira Junior, pela confiança, ensinamentos e apoio.

Aos colegas de trabalho envolvidos com a manutenção de baterias estacionárias do Metrô-SP.

Aos professores e colegas de classe, pelos ensinamentos.

Compra a verdade, e não a vendas; e também a sabedoria, a instrução
e o entendimento. (Provérbios 23:23)

RESUMO

Nascimento, Danilo Freires do. **Manutenção sob condição de baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas**. 2016. 71f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. São Paulo, 2016.

Este estudo apresenta uma análise de dados de deterioração das baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas que compõem os sistemas de alimentação de emergência das cargas prioritárias das estações da Linha 1 – Azul do Metrô de São Paulo. O objetivo é a definição do tempo ótimo de atuações das equipes de manutenção (inspeções e manutenções preventivas), definição do tempo ótimo de substituição preventiva e ponto ótimo de ressuprimento. Aplica a teoria da engenharia da confiabilidade no que se refere à análise de deterioração e análise de dados de vida. As etapas deste estudo de caso englobam: apresentação dos princípios construtivos e de funcionamento das baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas, seus modos de falha e mecanismos de deterioração, as abordagens da engenharia da confiabilidade para análise de deterioração, coleta e análise dos dados de deterioração das baterias e as conclusões e recomendações. O estudo obteve resultados de análises que podem trazer melhorias na gestão destes ativos, desde sua aquisição até sua substituição, tais como, ganhos financeiros e aumento de disponibilidade.

Palavras-chave: Bateria. Deterioração. Manutenção. Confiabilidade. Monitoramento.

ABSTRACT

Nascimento, Danilo Freires do. **On-condition maintenance of stationary lead-acid batteries**. 2016. 71f. Monograph (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. São Paulo, 2016.

This study presents a data analysis of the lead-acid vented batteries deterioration, that make up the emergency power systems of the stations' priority loads of São Paulo's Subway Line 1 - Blue. The objective is a definition of the optimal time for maintenance teams' actuations (preventive inspections and maintenance), definition of optimal preventive replacement time and optimum resupplying point. It applies Reliability Engineering theory, like Deterioration and Life Data Analysis. This case study encompasses: presentation of the vented stationary batteries constructive and operating concepts, failure modes and deterioration mechanisms, as reliability engineering approaches for deterioration analysis, collection and analysis of deterioration data of batteries, conclusions and recommendations. The study obtained results of analyzes that can bring improvements in the management of its assets, from acquisition to replacement, such as financial gains and increased availability.

Keywords: Battery. Deterioration. Maintenance. Reliability. Monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Vista interna de uma bateria chumbo-ácida de fabricação Teleco.....	19
Figura 2: Instalação de sistema de bateria chumbo-ácida estacionária	20
Figura 3: Tensão do elemento durante descarga em corrente constante	21
Figura 4: Curva da vida ideal da bateria.....	24
Figura 5: Possíveis variações a partir da curva Ideal Vida útil da bateria.....	24
Figura 6: Fluke FLUKE-BT521 Advanced Battery Analyzer.....	27
Figura 7: Procedimentos básicos para a análise de degradação	28
Figura 8: Valor crítico (limite) da degradação	30
Figura 9: Mudança da condição durante a operação	31
Figura 10: Parâmetro da condição como uma variável aleatória.....	32
Figura 11: Abordagem da confiabilidade baseada no parâmetro da condição	33
Figura 12: Função da Confiabilidade baseada na abordagem do parâmetro da condição.....	36
Figura 13: Análise da priorização de uso das distribuições em função dos dados (ranking) ...	37
Figura 14: O intervalo P-F.....	38
Figura 15: Intervalo P-F residual (1)	40
Figura 16: Intervalo P-F residual (2)	40
Figura 17: Degradação x Tempo (Dados brutos)	44
Figura 18: Degradação x Tempo (Baterias que não atingiram o limite crítico de degradação)	45
Figura 19: Degradação x Tempo - Dados completos até o limite crítico	47
Figura 20: Exemplo de erro de estimativa dos dados (1)	49
Figura 21: Exemplo de erro de estimativa dos dados (2)	50
Figura 22: Gráfico da degradação x Tempo (1)	52
Figura 23: Gráfico da degradação x Tempo (2)	53
Figura 24: Função Densidade de Probabilidade (pdf).....	54
Figura 25: Função Densidade de Probabilidade de falha das Baterias Chumbo-ácidas.....	55
Figura 26: Relação entre a pdf e a cdf.....	56
Figura 27: Função Acumulada de Probabilidade de falha das Baterias Chumbo-ácidas	56
Figura 28: Relação entre a cdf e a confiabilidade	57
Figura 29: Função da Confiabilidade x Tempo das baterias Chumbo-ácidas	58
Figura 30: Determinação da Capacidade de Alarme através do gráfico de degradação	62
Figura 31: Determinação da Capacidade de Alarme através do cálculo da confiabilidade.....	63
Figura 32: Confiabilidade esperada da bateria após 7 anos de operação	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AGM – Bateria com separador de fibra de vidro absorvente
- C_3 – Capacidade real em regime de descarga de 3 h
- CA – Corrente alternada
- CC – Corrente contínua
- cdf* – *Cumulative distribution function* (função de distribuição cumulativa)
- FDT – *Failure Detection Threshold* (Limiar de detecção de falha)
- MCC – Manutenção centrada na confiabilidade
- MP – Manutenção preventiva
- NBR – Norma brasileira de regulamentação
- OCV – *Open-circuit voltage* (Tensão de circuito aberto)
- pdf* - *Probability density function* (função densidade de probabilidade)
- RCP – Parâmetro relevante da condição
- SLA – Bateria chumbo-ácida selada
- SoFa – Estado de falha
- SoFu – Estado de funcionamento
- Vcc – Volt em corrente contínua
- VRLA – Bateria chumbo-ácida regulada por válvula

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 FUNDAMENTOS DA BATERIA	17
2.1 TIPOS DE BATERIAS ESTACIONÁRIAS.....	18
2.1.1 A BATERIA CHUMBO-ÁCIDA ESTACIONÁRIA VENTILADA	19
2.1.1.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	20
2.1.1.2 CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA	21
2.1.1.3 ENVELHECIMENTO, DETERIORAÇÃO E FALHA.....	22
2.1.1.4 A CURVA DE VIDA IDEAL DE UMA BATERIA CHUMBO-ÁCIDA	23
2.1.1.5 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	25
2.1.1.6 RESISTÊNCIA INTERNA DA BATERIA.....	26
3 ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO	28
3.1 DESCRIÇÃO DA CONDIÇÃO DE UM ITEM.....	29
3.2 ABORDAGEM BASEADA NA CONDIÇÃO PARA DETERMINAR A CONFIABILIDADE.....	34
3.2.1 O INTERVALO P-F	38
3.2.2 O INTERVALO P-F RESIDUAL.....	40
3.2.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS DO PARÂMETRO RELEVANTE DA CONDIÇÃO DAS BATERIAS CHUMBO-ÁCIDAS.....	41
3.2.4 DETERMINAÇÃO DA VIDA MÉDIA	59
3.2.5 DETERMINAÇÃO DO TEMPO MÉDIO DE AQUISIÇÃO DE BATERIAS	59
3.2.6 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO P-F E DO FDT.....	61
3.2.7 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO P-F E DO FDT.....	63
3.2.8 OBTENDO O TEMPO ÓTIMO ENTRE INSPEÇÕES.....	64
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67

4.1 MELHORIAS FUTURAS	68
REFERÊNCIAS	69
GLOSSÁRIO	71

1 INTRODUÇÃO

As baterias estacionárias fornecem backup para vários sistemas de controle alimentados por CC em usinas, subestações, instalações de telecomunicações e outras aplicações que exijam um desligamento seguro e ordenado em caso de perda de energia primária. As baterias devem ser plenamente capazes e estar prontas em caso de uma emergência de energia, como uma falta de energia CA. Elas estão presentes em muitas aplicações de missão crítica onde atuam como o último nível de proteção em situações de falta de energia e também ajudam em situações de recuperação da fonte principal, fornecendo energia para o fechamento de disjuntores e para a partida de geradores. A abordagem de manutenção e as recomendações de acompanhamento de baterias foram desenvolvidas pela revisão de normas da indústria, orientações regulamentares, recomendações dos fabricantes e pela obtenção de contribuições de outros especialistas, incluindo usuários. Esta troca de informações garante que as bases para as práticas recomendadas sejam cuidadosamente pesquisadas e são flexíveis para incorporação em programas de manutenção existentes. Ela também fornece uma base para os programas de manutenção novos e/ou melhorados.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A operação adequada de equipamentos de missão crítica durante uma falta de energia CA depende da operação apropriada e confiável do sistema de alimentação alternativa do equipamento. A fonte de tensão auxiliar mais empregada em projetos de proteção é a bateria, que é formada por uma associação série (ou mista) de vários elementos com a capacidade de fornecer energia necessária aos diferentes usos, ou seja: abertura e fechamento das bobinas de disjuntores, sistema de sinalização, acionamento de motores para carregamento de mola de disjuntores e chaves seccionadoras motorizadas, iluminação de emergência, sistema de medição, sistema de comunicação, alimentação de relés de proteção, etc. “Toda subestação de potência é dotada de duas fontes de tensão para suprir as cargas necessárias ao seu funcionamento, denominadas serviços auxiliares: fonte de tensão em corrente contínua (CC) e fonte de tensão em corrente alternada (CA)” (Mamede, 2011, p. 41).

De acordo com Johnson (2002, p. 2-1), a bateria é como o coração de um sistema de energia CC e é a única fonte de energia elétrica existente durante uma falta da fonte de energia principal. A bateria pode permanecer em *stand-by* durante anos sem ter que fornecer energia de emergência; No entanto, sempre que necessário, deve satisfazer às exigências do sistema pelo tempo necessário.

O desempenho de uma bateria é medido pela sua disponibilidade, que é, por definição, na NBR 5462:

Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2001, p. 2).

A gestão do ciclo de vida das baterias chumbo-ácidas ventiladas estacionárias instaladas nas estações e subestações elétricas da Linha 1 – Azul é o objeto deste estudo, incluindo, a análise de sua degradação, estimação do tempo ótimo de ressuprimento, métodos para a avaliação de seu desempenho e determinação do intervalo ótimo entre manutenções preventivas (MPs).

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô é a empresa responsável pela implantação e operação do sistema de transporte metroviário no estado de São Paulo. Ela foi constituída no dia 24 de abril de 1968 e “possui cinco linhas em operação. Ao todo são 68,5 quilômetros de rede, 61 estações e 154 trens. Em 2015 foram transportados 1,117 bilhão de passageiros no sistema” (COMPANHIA..., 2016). Dentre os equipamentos que compõem este complexo sistema de transporte, estão as baterias chumbo-ácidas estacionárias, que fornecem energia de emergência para cargas essenciais, conforme citado na seção 1.1.

Em novembro de 1988, foi instalada a primeira bateria chumbo-ácida estacionária no Metrô de São Paulo, em caráter de teste, pois até então, só haviam sido instaladas baterias alcalinas. A partir de 1993, o Metrô passou a adotar como padrão o uso de baterias chumbo-

ácidas estacionárias em *backups* de sistemas de alimentação em 125 Vcc e sistemas de telecomunicações. Atualmente, a periodicidade do teste de capacidade das baterias é de 4 anos durante a vida útil e de 2 anos ao final de vida, com inspeções e medições de tensão e densidade dos elementos realizadas trimestralmente.

Após vários ciclos de medições e coletas de dados, faz-se necessário avaliar as periodicidades e as técnicas adotadas, a fim de se propor eventuais melhorias. As baterias chumbo-ácidas apresentam projetos construtivos bastante similares entre fabricantes, portanto, por se tratar de itens similares, toda a população de baterias chumbo-ácidas estacionárias da Linha 1 serão consideradas para estimativas de parâmetros de confiabilidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é propor alterações no método e na periodicidade da manutenção dos sistemas de baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas da Linha 1-Azul do Metrô-SP.

1.3.2 Objetivos específicos

Planeja-se atingir este objetivo geral através do alcance dos objetivos específicos abaixo relacionados:

- Pesquisar sobre a bateria chumbo-ácida estacionária ventilada;
- Levantar todos os dados de degradação das baterias;
- Analisar os seus dados de vida e sua degradação de acordo com as abordagens apresentadas;
- Determinar os parâmetros relevantes de degradação, estimar a vida média e o intervalo P-F, além do Limiar de Detecção de Falha (*Failure Detection Threshold – FDT*);
- Avaliar os custos envolvidos no ciclo de vida destes ativos;

- Propor mudanças que melhor relacionem o custo, o risco e o desempenho destes ativos.

1.4 JUSTIFICATIVA

O valor estimado das baterias chumbo-ácidas atualmente instaladas nas estações e subestações da Linha 1-Azul do Metrô-SP é de R\$ 1 927 140,00. Esta Linha “transportou em 2015, em média, 1 059 000 passageiros/dia útil” (COMPANHIA..., 2016), o que mostra a dimensão de sua importância para o sistema de transporte metropolitano de São Paulo. A indisponibilidade de uma bateria no momento de sua solicitação, combinada a outros fatores, pode causar grandes transtornos à operação comercial, tais como: o desligamento dos bloqueios da estação, desligamento das proteções dos equipamentos de média-tensão, desligamento da iluminação de emergência, etc.

A missão da gerência de manutenção do Metrô é definir estratégias e atividades de manutenção para obtenção da melhor relação entre risco, custo e desempenho de seus ativos. Este trabalho está alinhado ao planejamento estratégico desta gerência, no sentido de propor a substituição do ativo no melhor tempo possível, e evitar a exposição ao risco de indisponibilidade deste sistema de missão crítica.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Desde a adoção deste tipo de bateria, o Metrô tem seguido as recomendações das normas vigentes e dos manuais dos fabricantes na realização da manutenção, com o monitoramento da condição sistemático e periódico, tendo arquivado todos os relatórios de ensaios de capacidade, desde então. Todos os resultados dos 182 ensaios, realizados ao longo de 28 anos, estão arquivados e serão utilizados para a realização deste estudo. Em seguida, serão apresentadas as abordagens da Engenharia da Confiabilidade referentes à análise de deterioração a fim de se interiorizar seus conceitos e técnicas. Por fim, será utilizado o programa *Weibull++*, da ReliaSoft, para a realização dos cálculos, geração dos gráficos, estimação de parâmetros, extrapolação dos dados de deterioração, etc.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A fim de se apropriar de conhecimentos previamente investigados sobre o tema, foram pesquisados autores diversos que abordam assuntos relativos ao equipamento que é o objeto deste estudo, tais como conceitos, aplicações, tipos, componentes, modos de falha, etc. Também foram analisadas literaturas referentes a análise de deterioração de equipamentos, além de boas práticas de manutenção (confiabilidade e manutenção baseada na condição).

As macroetapas para o desenvolvimento deste estudo são:

- Pesquisa sobre a teoria das baterias chumbo-ácidas, quanto aos aspectos construtivos e de funcionamento;
- Levantamento dos manuais de operação e de manutenção do ativo;
- Coleta, classificação e categorização de dados dos ensaios de campo;
- Exame, análise crítica e interpretação dos dados de campo;
- Avaliação das estratégias e do plano de manutenção do ativo segundo os preceitos da análise de deterioração;

2 FUNDAMENTOS DA BATERIA

A proposta desta seção é dar subsídio ao leitor para entendimento das principais características físicas, construtivas, de funcionamento e de deterioração das baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas.

Uma bateria é um dispositivo que converte a energia química contida em seus materiais ativos em energia elétrica por meio de uma reação eletroquímica de oxirredução. No caso de um sistema recarregável, a bateria é recarregada por uma inversão do processo. Este tipo de reação envolve a transferência de elétrons de um material para outro através de um circuito elétrico.

Toda usina ou subestação possui um ou mais sistemas de alimentação auxiliares apoiados por bateria de CC. Estes sistemas operam equipamentos críticos quando uma perda de alimentação CA ocorre. Johnson (2002, p. 2-1) diz que, equipamentos críticos geralmente incluem os equipamentos necessários para um desligamento seguro da usina, garantir a segurança pessoal e proteger a propriedade. A energia de emergência de um sistema CC de suporte por baterias é geralmente fornecida para os seguintes equipamentos:

- Partida de Moto-gerador diesel;
- Inversores;
- Bombas de óleo de Emergência;
- Fontes de alimentação ininterrupta (UPS);
- Disjuntor e circuitos de controle de relé de proteção;
- Circuitos de instrumentação e controle vitais;
- Solenóide e válvulas motorizadas;
- Luz de emergência;
- Sistemas de aviso de Plantas;
- Sistemas de comunicação;
- Sistemas computacionais.

2.1 TIPOS DE BATERIAS ESTACIONÁRIAS

As baterias são classificadas como primárias ou secundárias. As primárias são projetadas para serem descarregadas apenas uma vez e depois descartadas, e as secundárias são projetadas para permitirem sua recarga. As baterias estacionárias são recarregáveis, e são, portanto, classificadas como baterias secundárias. “Baterias estacionárias são definidas também quanto a sua construção física e eletroquímica. Os seguintes tipos de baterias estacionárias são predominantemente utilizados em usinas e subestações” (JOHNSON, 2002, p. 2-2):

As baterias chumbo-ácidas ventiladas:

- Chumbo-cálcio;
- Chumbo-antimônio;
- Chumbo em selênio;
- Chumbo-estanho;
- Chumbo puro.

As baterias chumbo-ácidas reguladas por válvula:

- Eletrólito Absorvido;
- Eletrólito gelatinoso.

As baterias de níquel-cádmio:

- Pocket plate.

Este estudo limita-se à análise de degradação de baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas com liga de chumbo-antimônio, conforme citado na seção 1.1.

2.1.1 A bateria chumbo-ácida estacionária ventilada

Conforme descrito na Norma ABNT NBR 14198 - Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado — Terminologia (2016), o acumulador chumbo-ácido é, por definição “acumulador elétrico no qual os materiais ativos são o chumbo e seus compostos, e o eletrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico”, e uma bateria é o “conjunto de elementos ou monoblocos interligados eletricamente”.

Os seguintes componentes básicos são montados para formarem um elemento:

- Vaso, incluindo filtro de segurança e polos;
- Placas positivas de dióxido de chumbo;
- Placas negativas de chumbo;
- Separadores e retenções;
- Eletrólito de ácido sulfúrico.

Baterias ventiladas são tipicamente construídas em vasos transparentes ou translúcidos, através do qual o nível de eletrólito e os componentes internos podem ser vistos.

Cada elemento é constantemente ventilado através de um filtro de segurança na tampa do vaso. A Figura 1 mostra um acumulador chumbo-ácido ventilado típico.



Figura 1: Vista interna de uma bateria chumbo-ácida de fabricação Teleco

Fonte: http://www.teleco.com.br/imagens/tutoriais/tutorialbateria_figura1.jpg. Acesso em 06 set. 2016.

De acordo com a Johnson, “uma bateria chumbo-ácida é constituída por elementos individuais ligados em conjunto para fornecer a tensão de saída desejada. Um elemento único, composto de placas positivas e negativas montadas dentro de um recipiente que é cheio com um eletrólito de ácido sulfúrico” (JOHNSON, 2002, p. 2-9). A Figura 2, a seguir, mostra uma bateria chumbo-ácida estacionária ventilada em funcionamento.



Figura 2: Instalação de sistema de bateria chumbo-ácida estacionária

Fonte: Arquivo próprio.

2.1.1.1 Características elétricas

As características elétricas de baterias chumbo-ácidas são mais bem descritas pelas relações entre a tensão, a corrente e a capacidade da bateria. A tensão nominal do elemento chumbo-ácido é 2 V, enquanto que a tensão final de descarga de uma bateria é de 1,75 V por elemento. Um acumulador chumbo-ácido totalmente carregado tem uma tensão de circuito aberto (*Open-circuit voltage - OCV*) entre 2,05 e 2,15 V; a tensão exata varia com a densidade do eletrólito e da temperatura. A OCV aumenta com o aumento da densidade e diminui à

medida que a temperatura diminui, como expresso na equação de Nernst para o elemento chumbo-ácido:

$$E = 2,047 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{\alpha H_2SO_4}{\alpha H_2O} \right)$$

2.1.1.2 Características de descarga

De acordo com Johnson (2002, p. 2-22) o perfil de tensão esperado para uma bateria durante uma descarga de corrente constante é mostrado no gráfico da Figura 3. A bateria apresenta uma queda inicial na tensão quando ela começa a descarregar. Após a tensão se estabilizar de sua queda inicial, ela diminui gradualmente ao longo do tempo em que os materiais ativos e o ácido sulfúrico são consumidos na reação química. No fim da descarga, já não existem quantidades suficientes de material ativo e ácido sulfúrico para sustentarem a reação química e a tensão diminui rapidamente.

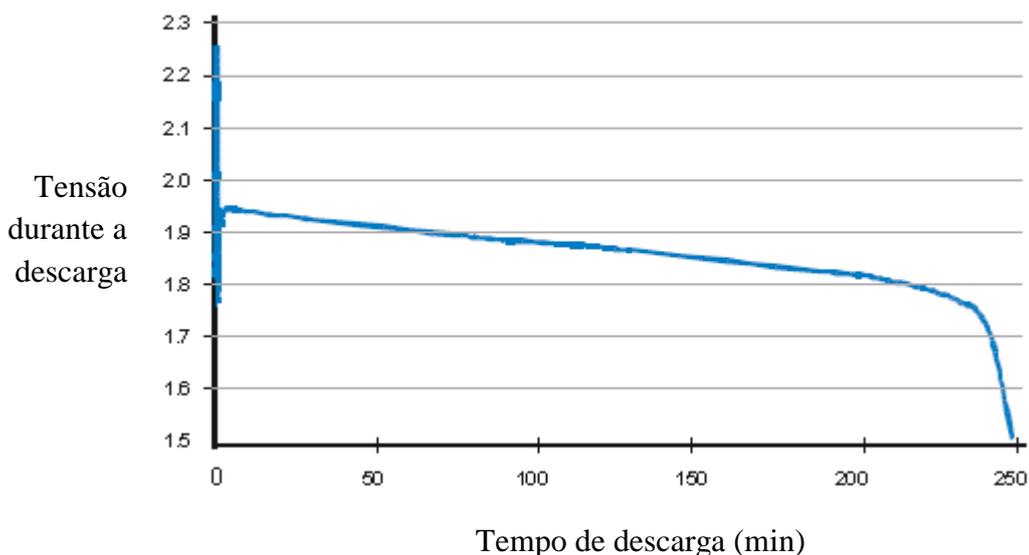


Figura 3: Tensão do elemento durante descarga em corrente constante

Fonte: Adaptado de Johnson (2002, p. 2-22).

A capacidade de uma bateria é comumente definida em ampères-hora (A h). A capacidade é a autonomia do acumulador sob determinadas condições, isto é, a uma

determinada corrente de descarga, até a tensão final de descarga, a uma determinada temperatura.

2.1.1.3 Envelhecimento, deterioração e falha

De acordo com Johnson (2002, p. 3-1), em condições ideais, as baterias chumbo-ácidas falham pelo envelhecimento natural, devido às seguintes causas:

- Expansão e corrosão da estrutura da grade positiva, devido à oxidação dos materiais da grade e da placa. Este mecanismo de deterioração é inevitável e é o modo de falha natural mais comum para baterias chumbo-ácidas mantidas em regime de carga de flutuação;
- A perda de material ativo da placa positiva;
- A perda de capacidade devido a mudanças físicas no material ativo da placa positiva.

Algumas baterias sobrevivem mais de 20 anos, com pouca perda de capacidade. Outros falham dentro de alguns anos de serviço. Vários fatores se combinam para afetar a vida da bateria; exemplos são listados a seguir.

- Vida Projetada: As baterias estacionárias estão normalmente disponíveis com uma vida útil de 5 a 20 anos – quanto maior a vida projetada, mais cara é a bateria;
- Temperatura: Temperaturas elevadas reduzem a vida útil da bateria. Um aumento de 15 °F (9,4 °C) pode reduzir a vida da bateria chumbo-ácida em 50 % ou mais.
- Ciclagem: ciclos excessivos de descarga profunda reduzem a vida das baterias;
- Sobrecarga: tensões de flutuação excessivamente altas causam uma elevação da taxa de corrosão da placa positiva. Sobrecarga também provoca gaseificação excessiva.
- Subcarga: Uma baixa tensão de flutuação reduz a capacidade devido à auto-descarga. A subcarga também pode resultar em excesso de sulfatação, o que pode danificar as placas.
- Ripple: corrente de ondulação excessiva pode contribuir para o envelhecimento da bateria.

- Variações de fabricação: variações de processamento de lote para lote podem diminuir a vida útil da bateria. Impurezas nos materiais e inconsistências na formação da placa também podem reduzir sua vida útil.

- Armazenamento inadequado: Armazenamento de elementos por um período superior ao recomendado pelo fabricante promove sulfatação, diminui a sua capacidade e sua vida, e pode exigir um procedimento especial de carregamento inicial. Os elementos podem ser permanentemente danificados e necessitarem de substituição.

- Erros de aplicação: Baterias são comumente concebidas para uma utilização específica. Se a bateria não é projetada para uma determinada aplicação, pode não corresponder às expectativas de vida ou de desempenho.

2.1.1.4 A curva de vida ideal de uma bateria chumbo-ácida

Se devidamente concebida, construída e mantida, uma bateria pode fornecer vários anos de serviço confiável. O perfil ideal de capacidade durante a vida operacional de uma bateria chumbo-ácida é mostrada no gráfico da Figura 4. Uma bateria pode não fornecer inicialmente 100 % da capacidade. A capacidade geralmente melhora ao longo dos primeiros anos de serviço, atinge um pico e declina até que a bateria chega ao fim da vida. “Como uma regra, nas descargas de longa duração de uma bateria chumbo-ácida ventilada, a capacidade é relativamente estável ao longo da maior parte de sua vida, mas começa a decrescer rapidamente em fases posteriores, com o “joelho” da curva de sua vida x capacidade ocorrendo a, aproximadamente, 80 % de sua capacidade nominal” (IEEE Std. 485, 2010, p. 56). De acordo com Johnson (2002, p. 3-2), a redução para 80 % da capacidade nominal é normalmente definida como o fim de vida para uma bateria chumbo-ácida. Abaixo de 80 %, a taxa de deterioração da bateria acelera, ficando ela mais propensa a falha súbita resultante de um choque mecânico (tal como um evento sísmico) ou uma alta taxa de descarga.

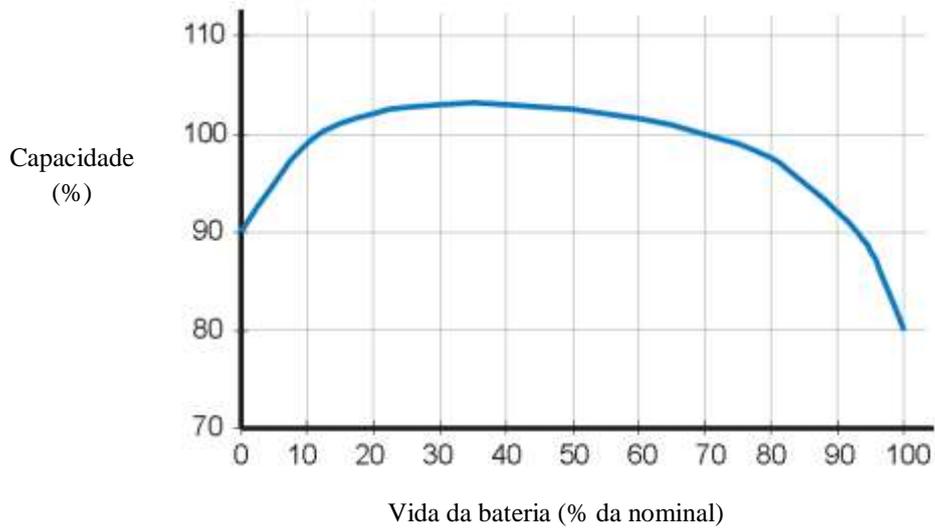


Figura 4: Curva da vida ideal da bateria
Fonte: Adaptado de Johnson (2002, p. 3-2).

Mesmo sob condições ideais, é esperado um envelhecimento da bateria. A Figura 5 apresenta as possíveis variações de desempenho de uma bateria chumbo-ácida.

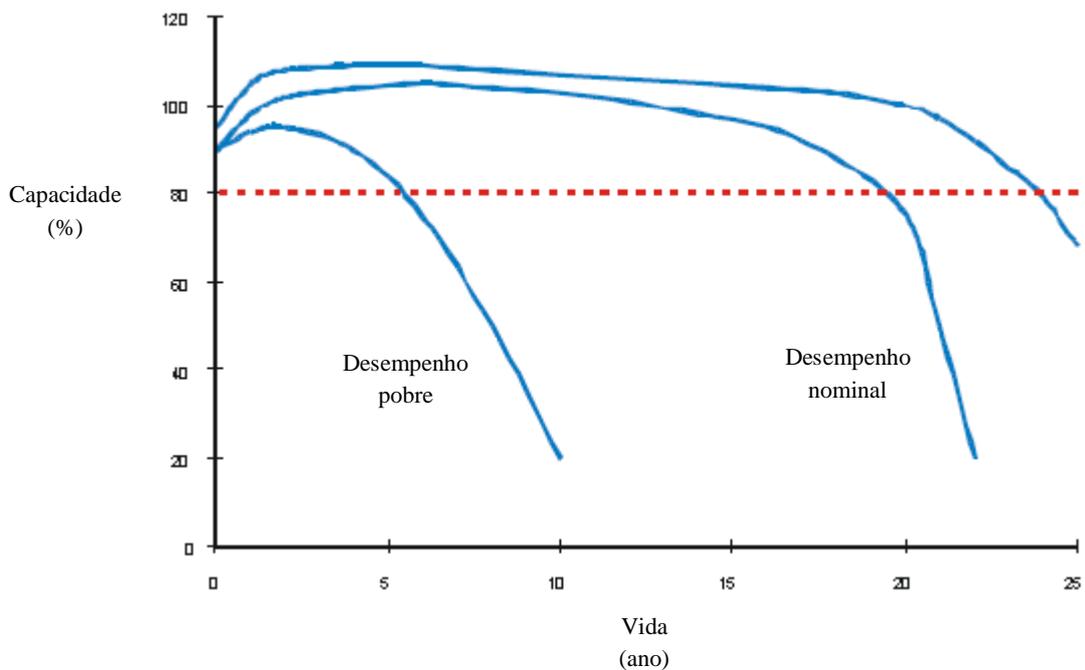


Figura 5: Possíveis variações a partir da curva Ideal Vida útil da bateria
Fonte: Adaptado de Johnson (2002, p. 3-3).

2.1.1.5 Mecanismos de deterioração

De acordo com Johnson (2002, p. 3-3), o envelhecimento e os mecanismos de deterioração de baterias chumbo-ácidas ventiladas são razoavelmente bem compreendidos. Uma bateria chumbo-ácida se desgasta pelo envelhecimento natural e inevitável, mas, se devidamente selecionada, instalada, operada e mantida, ela pode fornecer muitos anos de serviço de *standby*. Analogamente, um ambiente hostil, mau funcionamento e/ou manutenção, limitam severamente a vida da bateria e seu desempenho.

Componente	Material	Mecanismo de Deterioração
Estrutura da grade	Liga de chumbo	Temperatura ambiente elevada Sobrecarga Carga insuficiente Impurezas
Matéria ativa	Dióxido de chumbo e sulfato de chumbo	Temperatura ambiente elevada Sobrecarga Carga insuficiente Perda de carga Ciclagem excessiva
Separadores	Esteira de borracha ou vidro	Temperatura ambiente elevada Perda de carga
Eletrólito	Ácido sulfúrico e água	Impurezas no eletrólito
Filtro de segurança	Alumina fundida	Choque mecânico
Barras coletoras	Liga de chumbo	Temperatura ambiente elevada Sobrecarga
Polos	Liga de chumbo, cobre ou inserções em liga de chumbo	Oxidação e corrosão Choque mecânico
Vaso e tampa	Vários tipos de plásticos	Choque mecânico Crescimento da placa positiva Produtos de limpeza impróprios

Quadro 1: Efeitos da deterioração sobre os componentes da bateria chumbo-ácida

Fonte: Adaptado de Johnson (2002, p. 3-11).

2.1.1.6 Resistência Interna da Bateria

Segundo Cardoso (2005, p 51), existe uma correlação entre a capacidade e a resistência interna da bateria, por meio da condutância. Com isso, pode-se considerar a condutância como sendo um parâmetro relevante da condição e determinar o estado de deterioração de uma bateria, tal como a capacidade real, obtida através do ensaio de capacidade. “De fato, teoricamente, qualquer sistema elétrico ou eletroquímico, quando atravessado por um fluxo de corrente elétrica, apresenta resistência ou impedância a esse fluxo.” (CARDOSO, 2005, p. 20) Assim, o valor absoluto da resistência interna é uma função da integridade dos condutores (polos, grades, conexões internas, placas, etc.) bem como da porção eletroquímica do sistema. As placas e conexões internas de um acumulador deterioram e mudam em dimensão no decorrer de sua vida útil. Durante esse período, também ocorrem processos corrosivos e perda de contato entre os condutores internos do acumulador e seus respectivos polos, levando ao aumento da resistência, além da perda de água, que aumenta os valores de impedância devido à diminuição da condutividade entre as placas. Qualquer desses processos de mudança aumenta a resistência ao fluxo de corrente e, naturalmente, um aumento significativo da resistência pode resultar em sérios problemas de superaquecimento, principalmente quando são empregadas altas taxas de descarga. Essas mudanças ocorrem de forma gradual e, embora, segundo dados práticos, baterias com tamanhos, idade e histórico de descarga similares, devem exibir leituras similares de resistência interna. “Dessa forma, em tese, as medidas de resistência interna, quando realizadas periodicamente, podem ser usadas para acompanhar o processo de degradação e envelhecimento da bateria.” Obtendo-se dados suficientes, pode ser feita uma projeção da vida útil remanescente da bateria.

O principal resultado do trabalho de Cardoso (2005) foi a obtenção da correlação entre a capacidade e a resistência interna, por meio da condutância. Esta é uma ferramenta importante, porém ainda é parcial, pois foi analisado apenas um tipo/modelo de bateria. Para se obter uma equação que seja mais abrangente, é necessária a realização de mais ensaios de envelhecimento, como o que foi realizado. Desta forma pode-se determinar com uma maior precisão a capacidade de armazenamento a partir da medida de condutância.

De acordo com Moubrey (2003, p. 410), um analisador de impedância de bateria, como o demonstrado na Figura 6, injeta um sinal AC entre os terminais da bateria e, a tensão resultante é medida e calculada. A impedância de cada elemento pode ser comparada tanto

com a última leitura efetuada, quanto com as impedâncias dos demais elementos da bateria. É importante que se faça uma leitura de base no início da vida da bateria.



Figura 6: Fluke FLUKE-BT521 Advanced Battery Analyzer

Fonte: <http://www.fluke.com/fluke/myen/battery-analyzers/Fluke-500.htm?PID=78738>. Acesso em: 09 set.

2016

Este capítulo demonstrou uma visão geral sobre conceitos, características construtivas e os mecanismos de deterioração das baterias chumbo-ácidas. Também foram abordados os parâmetros da capacidade e condutância/resistência interna de uma bateria para a avaliação de sua condição.

3 ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO

Esta seção apresenta os conceitos, métodos e cálculos referentes à análise de degradação (deterioração) de equipamentos sob o enfoque da Engenharia da Confiabilidade, que serão adotados para a análise dos dados das baterias.

Como apresentado na Figura 7, a análise da degradação envolve os seguintes principais procedimentos.

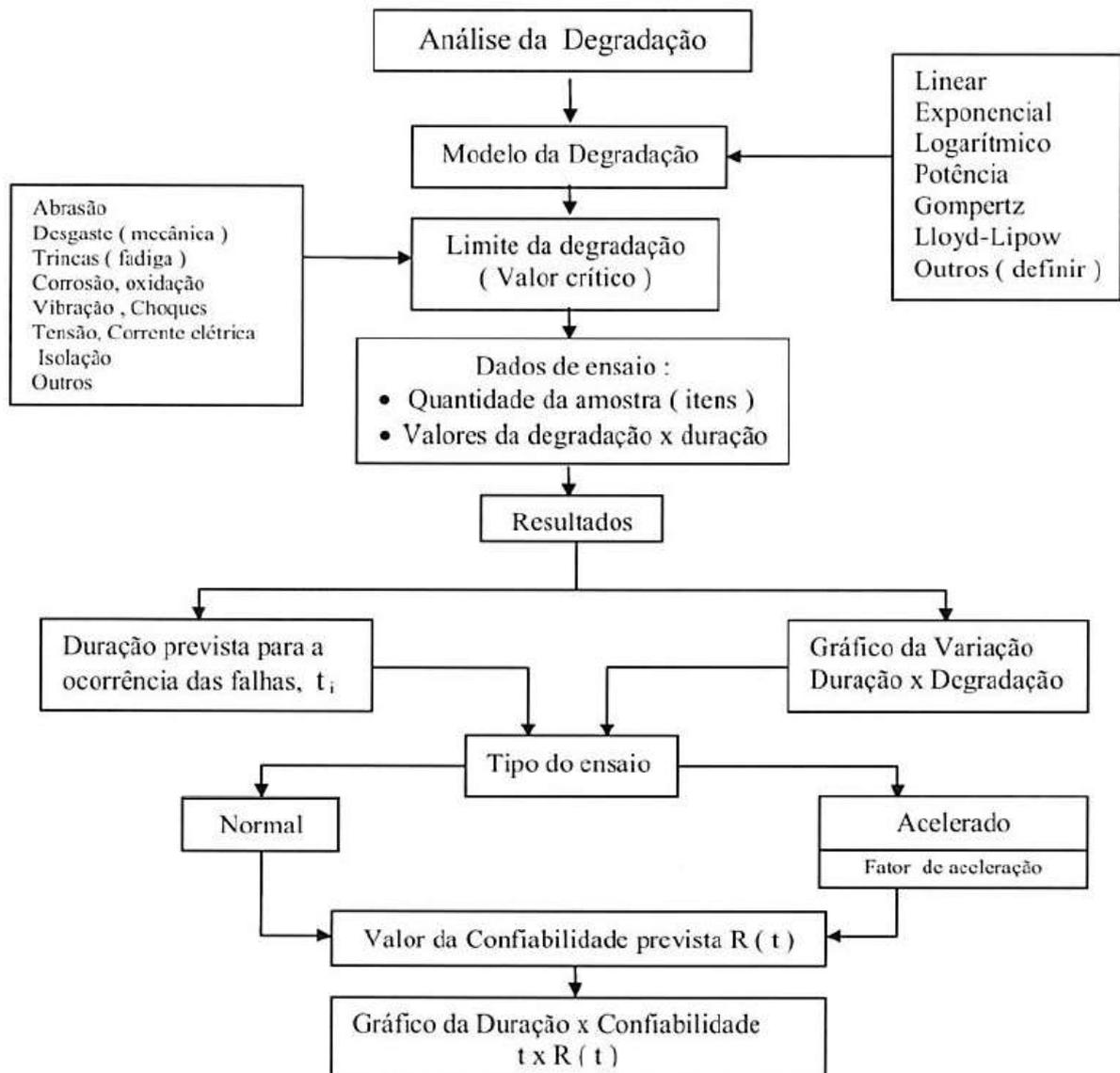


Figura 7: Procedimentos básicos para a análise de degradação

Fonte: Pallerosi, Vol. 1 (2010, p. 294).

3.1 DESCRIÇÃO DA CONDIÇÃO DE UM ITEM

De acordo com Pallerosi (2010, p. 294), “todos os produtos se degradam ao longo de seu uso. Não existe duração infinita, ou seja, com certeza o produto falhará ou será considerado fora de operação em um dado instante de sua vida”, seja por obsolescência, alto custo de manutenção, falta de produtividade, entre outros. Para Knezevic (2002, p. 89), a mudança da condição de um item é um processo contínuo durante sua vida operacional e um item só será capaz de desempenhar sua função requerida enquanto sua condição permanecer dentro de limites aceitáveis. **Com o objetivo de expressar a confiabilidade de um item através de sua condição é necessário descrever sua condição em um dado instante de tempo.** Este processo recebe o nome de análise de degradação.

Pallerosi (2010, p. 294) diz que o principal objetivo da análise da degradação de um produto é a obtenção da previsão da falha, baseada no seu desempenho durante o uso. Esta previsão baseia-se em modelos matemáticos que extrapolam as medidas do desempenho obtidas em ensaios até o ponto de sua possível ocorrência, ou seja, um valor limite (crítico) para os parâmetros de uso. Este parâmetro de uso é definido por Knezevic (2002) como sendo o parâmetro da condição, que pode ser qualquer característica que esteja diretamente conectada com o item e seu desempenho e que descreva a condição do item durante sua vida operacional. Em todo item é possível detectar várias destas características, somente algumas das quais irão satisfazer os seguintes requisitos:

- (a) Descrição completa da condição de um item;
- (b) Mudança contínua e monotônica durante a vida operacional;
- (c) Definição numérica da condição do item.

“O parâmetro da condição que satisfaça todos estes requisitos é chamado de **parâmetro relevante da condição** (*relevant condition parameter, RCP*), porque seu valor numérico descreve totalmente e quantifica a condição do item durante a vida operacional” (KNEZEVIC, 2002, p. 89). Desenvolvendo esta abordagem, um item está em estado de funcionamento pelo período em que o parâmetro relevante da condição encontra-se entre limites que são definidos pelo valor inicial, RCP_{in} , e valor limite, RCP_{lim} . Quando este parâmetro vai além dos limites prescritos, o item ou itens começam a operar insatisfatoriamente, assim:

$$SoFu = RCP_{in} < RCP < RCP_{lim}$$

$$Sofa = RCP > RCP_{lim}$$

A estimativa de um Valor limite (crítico) para a degradação, que define a vida útil do produto, ou seja, a partir do qual é esperada a ocorrência da falha do item é mostrada no gráfico da Figura 8.

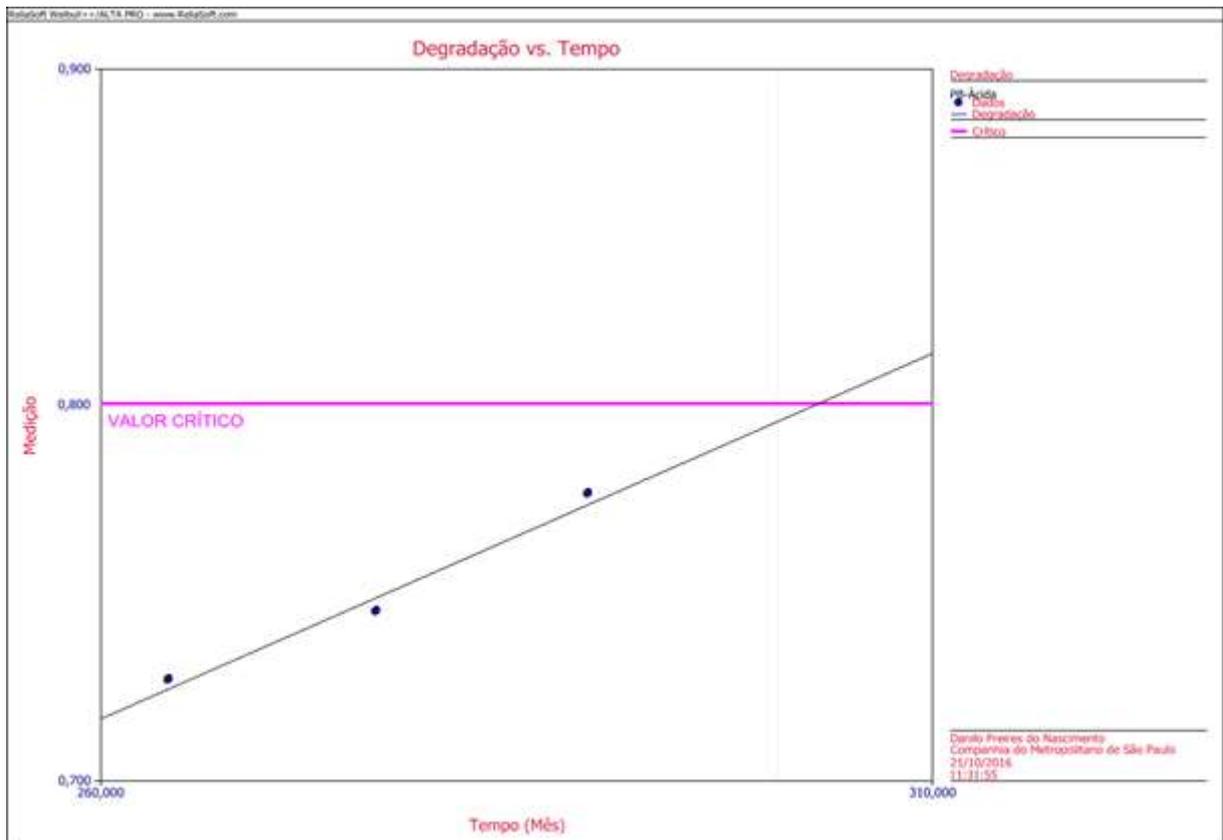


Figura 8: Valor crítico (limite) da degradação

Fonte: Software Weibull++.

Estudos do processo de mudança na condição (descritos pelo parâmetro relevante da condição) mostram que eles são processos aleatórios porque é impossível predeterminar como eles irão se desenvolver. Para Knezevic (2002, p. 90), um processo particular pode, portanto, ser expresso por uma série de curvas, como no gráfico da Figura 9, cada uma tendo uma probabilidade de ocorrência, e conseqüentemente, descritível somente pela teoria da probabilidade. Em um dado instante de tempo, a condição do item pode ser descrita através do

parâmetro relevante da condição, que pode ser qualquer valor entre o valor inicial e o valor máximo possível, RCP_{max} , assim:

$$RCP_{in} < RCP, t < RCP_{max}$$

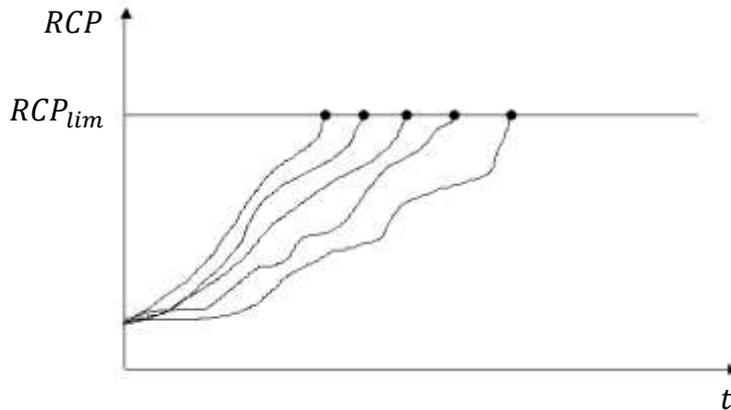


Figura 9: Mudança da condição durante a operação

Fonte: Adaptado de Knezevic (2002, p. 90).

Portanto, a todo instante de operação, o parâmetro relevante da condição, RCP, é uma variável aleatória que somente pode ser expressa através de sua distribuição de probabilidades. A função densidade de probabilidade de um parâmetro relevante da condição de um dado instante de tempo é denotada por $f_{RCP}(c, t)$, como mostrado no gráfico da Figura 10. Assim, **“a probabilidade do valor do parâmetro da condição estar dentro da faixa de tolerância para um dado tempo é também a probabilidade da operação confiável de todo o item”** (KNEZEVIC, 2002, p. 90).

$$P(RCP_{in} < RCP, t < RCP_{lim}) = R(t)$$

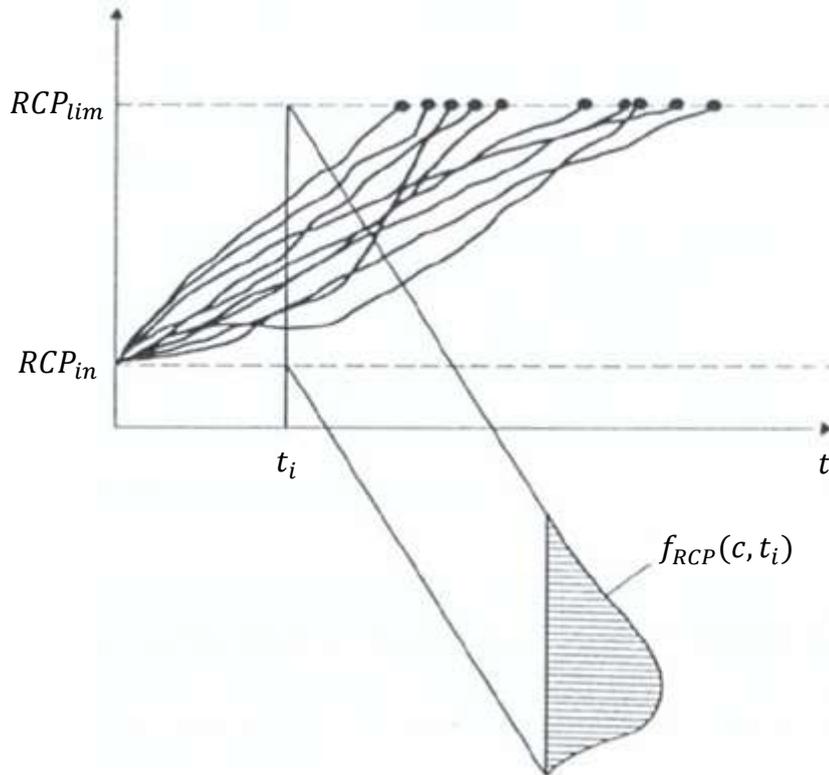


Figura 10: Parâmetro da condição como uma variável aleatória

Fonte: Adaptado de Knezevic (2002, p.91).

A probabilidade que RCP, no instante t , terá um valor dentro da faixa de tolerância, por exemplo, não excedendo o valor limite, pode ser definido como:

$$P(RCP_{in} < RCP, t < RCP_{lim}) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP}(c, t) dc$$

A equação acima descreve a probabilidade que a variável aleatória RCP em um dado tempo terá um valor em um intervalo aceitável. No entanto, no caso considerado, a probabilidade de que o parâmetro relevante da condição estar dentro da faixa de tolerância, em t , é também a probabilidade de que o item permanecerá funcional por um dado tempo, assim:

$$R(t) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP}(c, t) dc$$

A integral à direita da equação representa a diferença entre funções acumuladas de probabilidade do parâmetro relevante da condição no instante t , para os limites dados. Como, neste caso, o valor numérico do limite inferior é igual à zero, isto pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} R(t) &= F(c, t) \Big|_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} \\ &= F(RCP_{lim}, t) \end{aligned}$$

Uma descrição gráfica da abordagem da confiabilidade baseada no parâmetro da condição está apresentada no gráfico da Figura 11.

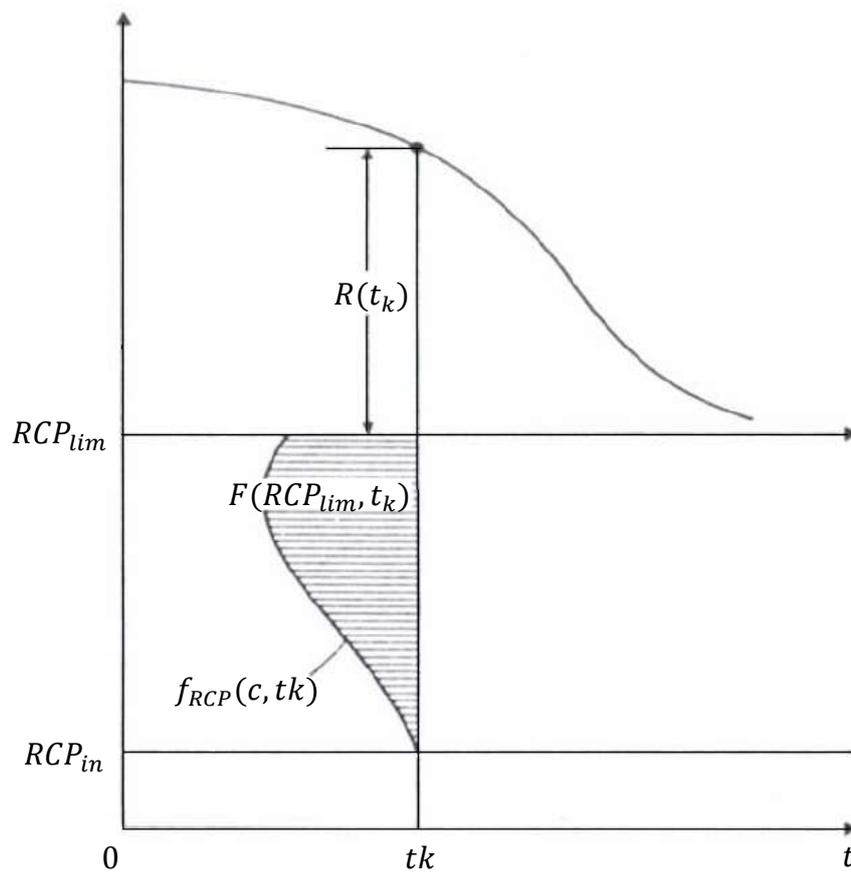


Figura 11: Abordagem da confiabilidade baseada no parâmetro da condição

Fonte: Adaptado de Knezevic (2002, p. 92).

3.2 ABORDAGEM BASEADA NA CONDIÇÃO PARA DETERMINAR A CONFIABILIDADE

De acordo com a abordagem da confiabilidade baseada no parâmetro da condição apresentada acima, pode-se dizer que:

1. A confiabilidade de um item pode ser expressa pela sua condição;
2. A condição do item a qualquer instante de tempo pode ser descrita pelo parâmetro relevante da condição, RCP ;
3. O estado de falha é definido pelo instante de tempo quando o parâmetro relevante da condição excede seu nível limite, $RCP > RCP_{lim}$;
4. O parâmetro relevante da condição a qualquer instante de tempo é uma variável aleatória, que é totalmente definida por sua função distribuição de probabilidade, por exemplo: $f_{RCP}(c, t)$.

A fim de determinar um modo de descrever o mecanismo de mudança da condição, o $RCP(t)$ denota a função aleatória de tempo que descreve este processo aleatório. As mudanças no $RCP(t)$ ao longo do tempo estão condicionadas tanto por fatores externos quanto pelo curso dos processos físicos que ocorrem dentro do item. Uma das maneiras possíveis de expressar a distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias contínuas é a função densidade de probabilidade, $f(\cdot)$. A função densidade de probabilidade de um parâmetro relevante da condição a um instante de tempo de operação t é denotado por $f_{RCP}(c, t)$. “Há um número infinito de tais distribuições, correspondendo ao número infinito de possíveis instantes de tempo de operação. Como um resultado de um cálculo preciso destas distribuições está associado com muitos problemas matemáticos sem solução” (KNEZEVIC, 2002, p. 90).

Algumas simplificações são, portanto, necessárias e iremos assumir que todas as funções de probabilidade pertencem a uma família de distribuições de probabilidade. Isto significa que a lei distributiva de intersecção vertical da função aleatória $RCP(t)$ durante o tempo de operação não muda. Mesmo com esta suposição é impossível determinar parâmetros que definam cada uma destas distribuições para todo instante de tempo, mas é possível encontrar valores numéricos para algumas delas. Conhecendo a distribuição de probabilidade

do parâmetro relevante da condição de vários instantes de tempo, t_j , $j = 1, m$, nós ainda não conhecemos a relação entre elas ao longo do tempo de operação.

A fim de determinar esta relação nós iremos considerar parâmetros que definem estas distribuições de probabilidade, $P T_i$, $i = 1, n$. No caso das distribuições normal e log-normal $n = 2$, para Weibull $n = 2$ ou 3 , etc. Valores numéricos destes parâmetros podem ser aproximados por uma função dependente do tempo, chamada $P T_i(t) = \psi_i(t)$, $i = 1, n$. Estas são chamadas **funções de deslocamento**. A fim de determiná-las é necessário encontrar tantos pontos quanto possível os quais apresentem valores de $P T_i(t_j)$ em diferentes instantes de tempo de operação, $j = 1, m$. As funções de deslocamento podem ser obtidas muito simplesmente pelo uso de diagrama de pontos, na base do qual a curva de regressão pode ser traçada. A precisão dos resultados obtidos para uma descrição do mecanismo de mudança dependerá diretamente do quão perto as hipóteses estão da realidade.

Esta abordagem de confiabilidade pode ser aplicada ao cálculo do tempo médio até a falha, MTTF, que pode ser expresso pela equação:

$$MTTF = \int_0^{\infty} F(RCP_{lim}, t) dt$$

E a função de confiabilidade representa a intersecção entre a função aleatória $RCP(t)$ e a linha horizontal definida como $RCP = RCP_{lim}$, então:

$$R(t) = F(RCP_{lim}, t) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP}(c, t) dc$$

A abordagem apresentada é baseada na condição do item e sua mudança durante a vida operacional. Tal abordagem fornece uma imagem mais completa da condição do item e seus itens através do tempo de vida porque ela é baseada em um processo contínuo de mudança ao invés da abordagem de tempos-até-a-falha que é baseada somente nos momentos de transição para o estado de falha. **A informação sobre mudanças na condição é muito valiosa para engenheiros, principalmente ao engenheiro de manutenção que pode basear a política e a estratégia de manutenção sobre este conhecimento.** Esta abordagem é geralmente aplicada a todos os itens manufaturados, e especialmente aqueles que são submetidos a processos de desgaste, que cause uma deterioração gradual do material.

Os principais problemas na aplicação prática desta abordagem são a seleção dos parâmetros relevantes da condição, e a determinação dos parâmetros da distribuição de probabilidade para $RCP(t)$. Não é garantido que um parâmetro relevante da condição exista para todo item de engenharia ou que sempre será possível encontrar-se uma função para a mudança da condição, devido às limitações do equipamento disponível. Isto pode limitar o valor desta abordagem.

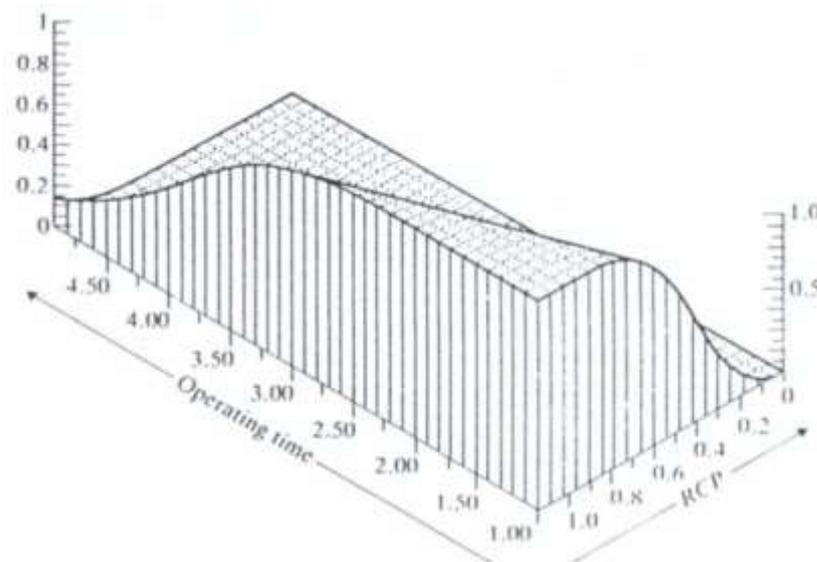


Figura 12: Função da Confiabilidade baseada na abordagem do parâmetro da condição

Fonte: Adaptado de Knezevic (2002, p. 95).

Pallerosi (2010, p. 295) diz que a adoção de um *modelo matemático* para a evolução do parâmetro de degradação (*Linear, Exponencial, Logarítmico, Potência, etc.*). A escolha do modelo é baseada em experiências anteriores, comparação com produtos similares, ou análises baseadas em projetos de experimentos (Taguchi, etc.). Um modelo adequado proporcionará bons resultados práticos. Esta adequação pode ser verificada em gráficos de correlação “Degradação x Tempo”. A utilização do programa computacional Weibull++ permite uma rápida avaliação de qual modelo é o mais adequado (*ranking*), como apresentado na Figura 13.

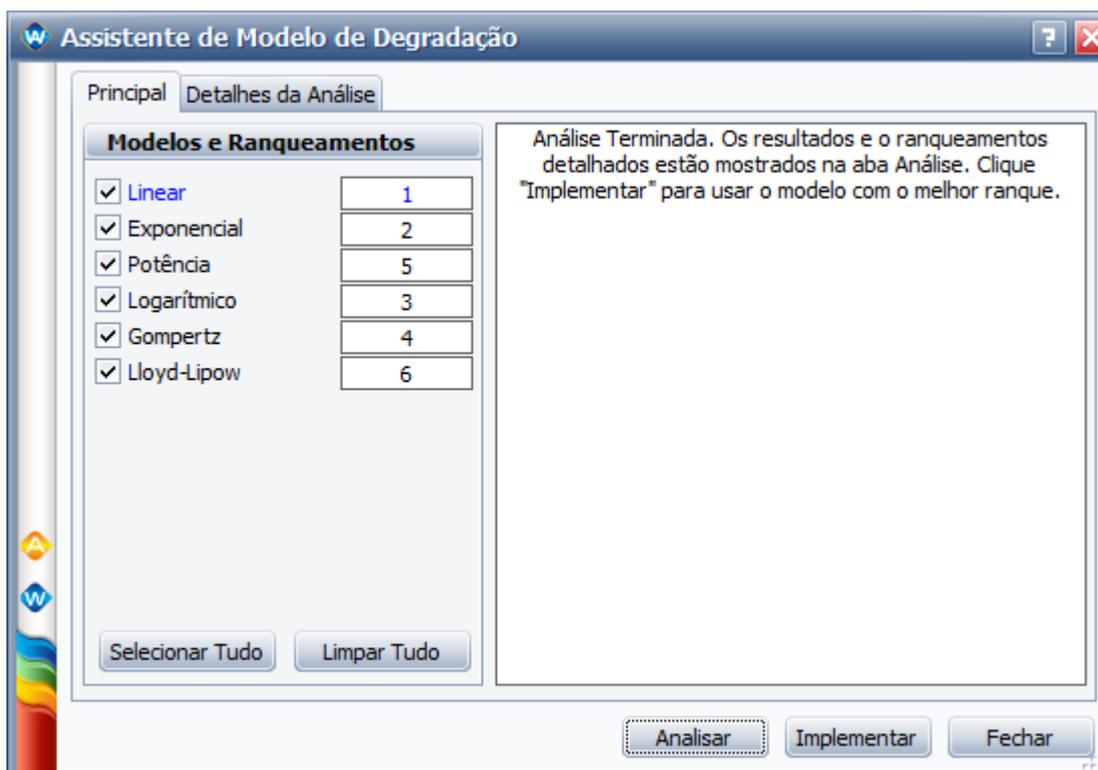


Figura 13: Análise da priorização de uso das distribuições em função dos dados (ranking)

Fonte: Programa Weibull++.

Segundo Pallerosi (2010, p. 295, a utilização de amostras significativas, aleatoriamente escolhidas. Deve-se ter pelo menos dois itens para ensaio. Obviamente, quanto maior a quantidade da amostra, mais precisos os resultados obtidos. Uma quantidade aceitável para os ensaios corresponde a pelo menos 5 itens.

A escolha de intervalos (pontos) de medição adequados que permitam analisar e visualizar a evolução da degradação. Se no início a degradação é pouco significativa, as medições devem ser concentradas em períodos posteriores, ou seja, os pontos de medição (tempos e ciclos) não necessariamente devem ocorrer em intervalos constantes. Em certas aplicações é possível o registro contínuo, por exemplo, com o uso de sistemas de aquisição de dados, monitorados e registrados. “Dados completos permitirão avaliar o tempo até a falha próprio de cada componente e, assim, assegurar maior precisão no planejamento dos intervalos de manutenção preventiva” (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009, p. 246).

Os processos de medição devem ser precisos o suficiente para não gerarem incertezas e variações significativas aos valores medidos da degradação. Obviamente instrumentos de medição descalibrados ou gastos pelo uso, podem induzir uma evolução errônea dos parâmetros em análise.

Os procedimentos de ensaio podem ser referidos a Ensaios Acelerados ou Normais. No caso de acelerados, devem ser conhecidos os parâmetros (ou constantes) da função de aceleração (Duração ou Taxa de falha).

3.2.1 O intervalo P-F

Uma falha potencial é uma condição identificável que indica se a falha funcional está para ocorrer ou em processo de ocorrência. Em acréscimo a falha potencial em si, precisa-se considerar o tempo (ou o número de ciclos de tensão) que decorre entre o ponto no qual a falha potencial ocorre – ou seja, o ponto que a torna *detectável* – e o ponto onde se deteriora na falha funcional. Este intervalo é conhecido como intervalo P-F, como mostra a Figura 14. Conforme descrito na Reliability Hotwire (2007), a curva mostra que como a falha se manifesta no início, o equipamento se deteriora até o ponto em que ela pode ser detectada (P). Se a falha não é detectada e mitigada, ela continua até a falha crítica ocorrer (F). O intervalo de tempo entre P e F, conhecido como intervalo P-F, e é a janela de oportunidade durante a qual uma inspeção pode detectar a falha iminente e solucioná-la. Intervalos P-F podem ser medidos em qualquer unidade associada com a exposição ao estresse (tempo de funcionamento, ciclos, quilômetros, etc.). Por exemplo, se o intervalo P-F é 200 dias e o item irá falhar em 1000 dias, a falha gradual começa a ser detectada em 800 dias.

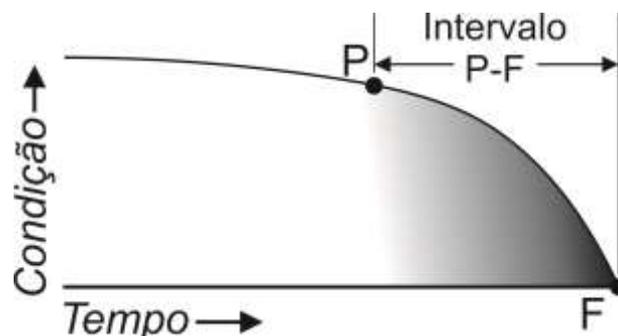


Figura 14: O intervalo P-F

Fonte: Adaptado de Moubray (2000, p. 145).

Além do intervalo P-F, a indicação de quando a aproximação da falha tornar-se-á detectável durante as inspeções pode ser especificado usando-se um fator chamado de **Limiar de Detecção de Falha (FDT)**. O FDT é um número entre 0 e 1 que indica a porcentagem da vida de um item que deve decorrer antes que a falha gradual possa ser detectada. Por exemplo, se o FDT é 0,9 e o item irá falhar com 1000 dias, a falha gradual começa a ser detectável, decorridos 90 % de sua vida, o que significa 900 dias, neste caso ($0,9 * 1000 = 900$).

O intervalo P-F nos mostra frequentemente como devem ser as tarefas sob-condição. Deseja-se detectar a falha potencial antes que se torne uma falha funcional, portanto, o intervalo entre as verificações deve ser menor que o intervalo P-F.

Para se calcular o intervalo P-F e o FDT, é necessário que se estipule um percentual da vida do item a partir do qual a degradação começa a ser passível de detecção.

Devido às características da bateria chumbo-ácida descritas na seção 2.1.1.3, a degradação de seus componentes e a redução gradual de seu desempenho ocorrem em praticamente toda sua vida, desde os primeiros anos de operação, sendo possível, desde então, sua medição e quantificação.

O intervalo P-F é também conhecido como período de advertência, o tempo marginal da falha (*lead time* da falha) ou o período de desenvolvimento da falha. Pode ser medido em qualquer unidade que possibilite uma indicação de exposição ao esforço (tempo decorrido, unidades de produção, ciclos de liga-desliga, etc.), mas por razões práticas, costuma ser medido em termos de tempo transcorrido. Para diferentes modos de falha, este tempo varia de frações de segundo até muitas décadas.

Observe que se uma tarefa sob-condição for feita em intervalos maiores que o intervalo P-F, há chance de deixar passar a falha totalmente. Por outro lado, fazendo-se a tarefa a uma porcentagem de intervalo P-F muito pequena, perdem-se recursos no processo de checagem.

Na prática, é suficiente selecionar a frequência de uma tarefa como sendo a metade do intervalo P-F. Isto assegura que a inspeção detectará a falha potencial antes de ocorrer a falha funcional, enquanto (em muitos casos) consegue-se tempo suficiente para fazer alguma coisa a respeito. Isto leva ao conceito de *intervalo P-F residual*.

3.2.2 O intervalo P-F residual

O intervalo P-F residual é o intervalo mínimo decorrido entre a *descoberta* da falha potencial e a ocorrência da falha funcional.

Está ilustrada, nas Figuras 15 e 16, uma falha com um intervalo P-F de nove meses.

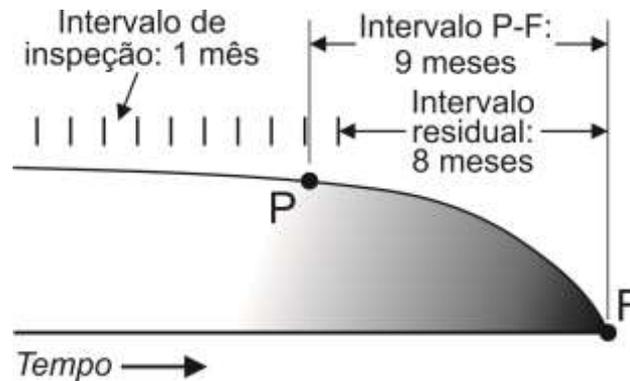


Figura 15: Intervalo P-F residual (1)

Fonte: Adaptado de Moubray (2003, p. 146).

A Figura 15 mostra que se o ativo for sendo inspecionado mensalmente o intervalo residual P-F é de 8 meses, mas se a inspeção for feita com intervalo de 6 meses, como mostra a Figura 16, o intervalo residual P-F será de 3 meses. No primeiro caso o tempo mínimo disponível para fazer alguma coisa em relação à falha é de cinco meses a mais do que no segundo, porém a tarefa de inspeção tem que ser feita com frequência seis vezes maior.

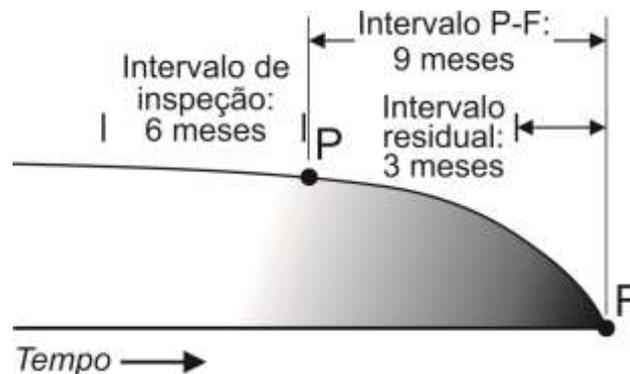


Figura 16: Intervalo P-F residual (2)

Fonte: Adaptado de Moubray (2003, p. 147).

O intervalo residual P-F determina a quantidade de tempo disponível para tomar qualquer ação necessária para reduzir ou eliminar as consequências da falha. Dependendo do contexto operacional do ativo, o alerta de falha insipiente possibilita ao usuário reduzir ou evitar consequências tais como:

- tempo de paralização;
- custos de reparo;
- segurança;

3.2.3 Levantamento dos dados do parâmetro relevante da condição das baterias chumbo-ácidas

O parâmetro relevante da condição (RCP) das baterias chumbo-ácidas ventiladas estacionárias adotado pela gerência de manutenção do Metrô é a **capacidade residual (C)**, obtida como o resultado dos testes de capacidade realizados periodicamente em cada bateria, pela equipe de manutenção preventiva de baterias e carregadores/retificadores. A capacidade residual é expressa como um percentual da capacidade nominal da bateria. Os tempos de inspeções e dados do RCP (C) levantados ao longo de 28 anos de testes de capacidade, realizados em bancos de baterias chumbo-ácidas da Linha 1 – Azul, de 12 modelos diferentes são apresentados no Quadro 2, a seguir. Considera-se como limite inferior crítico deste parâmetro, o valor de $C = 0,8$ (80 % da capacidade nominal da bateria). No quadro, as linhas em vermelho indicam que, naquele ensaio de capacidade, o valor obtido está abaixo do valor crítico.

Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria	Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria
1	0,9719	ARV 1	1	1,1486	SCZ 1
21	0,916	ARV 1	50	0,9784	SCZ 1
88	0,8712	ARV 1	98	1,098	SCZ 1
136	0,86	ARV 1	197	0,8383	SCZ 1
178	0,7136	ARV 1	221	0,833	SCZ 1
203	0,127	ARV 1	1	1,192	SCZ 2

(Continua)

Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria	Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria
1	0,9771	ARV 2	50	0,9784	SCZ 2
21	0,944	ARV 2	98	1,0641	SCZ 2
88	0,9221	ARV 2	197	0,8486	SCZ 2
136	0,9559	ARV 2	221	0,8783	SCZ 2
178	0,8783	ARV 2	67	1,0482	TTE 1
203	0,7136	ARV 2	114	0,9962	TTE 1
2	1,0244	BTO 1	148	1,2675	TTE 1
3	1	BTO 1	220	1,0156	TTE 1
15	1	BTO 1	246	0,2209	TTE 1
27	1,2259	BTO 1	67	1,1	TTE 2
39	1,1666	BTO 1	114	1,2065	TTE 2
50	1,2408	BTO 1	160	1,0369	TTE 2
89	1,1388	BTO 1	220	0,9765	TTE 2
101	1,0492	BTO 1	246	0,9388	TTE 2
126	1,1737	BTO 1	4	1,323	VMN 1
136	1,0555	BTO 1	52	1,0156	VMN 1
148	1,1666	BTO 1	88	1,0969	VMN 1
159	1,1187	BTO 1	196	1,1187	VMN 1
172	1,1597	BTO 1	244	1,0046	VMN 1
184	1,2016	BTO 1	267	0,9607	VMN 1
196	1,0619	BTO 1	4	1,2207	VMN 2
208	0,8835	BTO 1	52	1,0101	VMN 2
255	0,7094	BTO 1	88	1,0895	VMN 2
267	0,6074	BTO 1	184	1,1254	VMN 2
2	0,9717	BTO 2	244	0,9823	VMN 2
3	0,994	BTO 2	267	0,0818	VMN 2
15	1	BTO 2	1	1,3088	WAR
27	1,2039	BTO 2	48	1,2044	WAR
39	1,0768	BTO 2	96	1,1178	WAR
50	1,1498	BTO 2	147	1,0493	WAR
89	1,0555	BTO 2	198	0,9501	WAR
101	1,0768	BTO 2	235	0,9058	WAR
114	1,1111	BTO 2	1	1,1598	WCD
126	1,1457	BTO 2	49	1,1366	WCD
137	1,1431	BTO 2	97	1,0246	WCD
148	1,1666	BTO 2	202	0,7399	WCD
159	1,1363	BTO 2	1	1,1314	WJA
172	1,1597	BTO 2	61	1,0833	WJA
184	1,2016	BTO 2	108	1,0216	WJA
197	1,1808	BTO 2	167	1,0041	WJA
208	1,1666	BTO 2	215	0,9881	WJA
255	1,1112	BTO 2	1	1,2275	WJQ
267	0,9881	BTO 2	48	1,1415	WJQ
1	1	CDU	97	1,0047	WJQ
49	1,0882	CDU	147	1,0749	WJQ
98	1,349	CDU	3	1,1222	WJU
2	0,9784	CON 1	64	1,1178	WJU
54	0,9444	CON 1	112	1,146	WJU

(Continua)

Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria	Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria
101	0,9444	CON 1	161	1,0683	WJU
148	0,7136	CON 1	209	0,8985	WJU
2	0,9784	CON 2	237	0,8486	WJU
5	1	CON 2	1	1,2222	WLU
54	1	CON 2	48	0,9881	WLU
101	0,9722	CON 2	97	1,0183	WLU
148	0,3842	CON 2	102	0,7804	WLU
1	1,2406	LIB 1	157	0,4418	WLU
54	1,25	LIB 1	1	1,2459	WPS
107	1,0478	LIB 1	49	1,1261	WPS
157	1,1321	LIB 1	95	0,9823	WPS
219	1,153	LIB 1	143	0,9223	WPS
1	1,2189	LIB 2	215	0,6703	WPS
48	1,3097	LIB 2	1	1,0898	WTT
107	1,1528	LIB 2	50	1,0183	WTT
157	1,2006	LIB 2	98	1,1045	WTT
219	1,0769	LIB 2	144	1,0882	WTT
1	1,2514	PAT BI B	191	0,9049	WTT
97	1,2777	PAT BI B	1	1,205	WVM
143	1,132	PAT BI B	50	1,006	WVM
192	1,034	PAT BI B	98	1,2296	WVM
241	0,8716	PAT BI B	147	1,0749	WVM
1	1,1928	SAN 1	191	1,0156	WVM
62	1,0166	SAN 1	240	0,2485	WVM
109	1,0696	SAN 1	3	1,1406	YCE
155	1,0619	SAN 1	61	1,0369	YCE
203	1,0041	SAN 1	107	1,0571	YCE
227	0,9277	SAN 1	157	1,1111	YCE
240	0,8951	SAN 1	203	0,9335	YCE
266	0,1637	SAN 1	226	0,7115	YCE
1	1,1818	SAN 2	4	1,1388	YCI
62	1,005	SAN 2	55	1,3661	YCI
109	1,1034	SAN 2	102	1,3376	YCI
155	0,9444	SAN 2	2	1,1597	YSA
203	0,9765	SAN 2	48	0,9983	YSA
228	0,9166	SAN 2	96	1,2027	YSA
239	0,9542	SAN 2			
266	0,2984	SAN 2			

Quadro 2: Dados de Degradação das baterias (Dados brutos)

Fonte: Arquivo próprio.

A partir destes dados e com o uso do Software Weibull++, da Reliasoft, é possível traçar as curvas de degradação estimadas para cada banco e realizar uma primeira análise, conforme apresentado no gráfico da Figura 17.

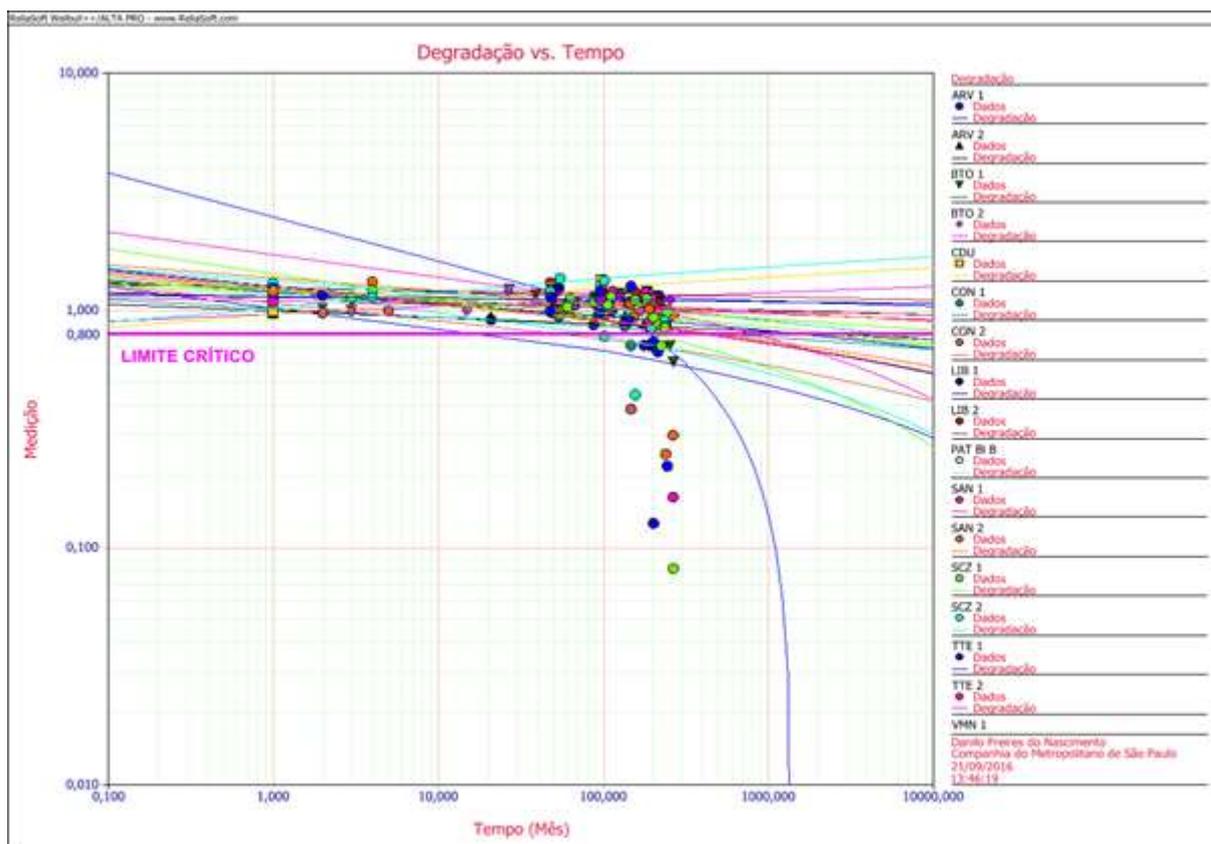


Figura 17: Degradação x Tempo (Dados brutos)

Fonte: Arquivo próprio.

Observando-se a extrapolação dos dados do gráfico da Figura 17, algumas considerações devem ser feitas com relação a esta amostra. Pode-se observar que algumas baterias não apresentam quantidade suficiente de medições para que haja uma tendência coerente com o padrão de decaimento da curva característica das baterias chumbo-ácidas (vide Figura 4, p. 24). A capacidade deve apresentar uma acentuação na taxa de decaimento (joelho), próximo ao limite crítico definido em 0,8. Por exemplo, no Quadro 2, pode-se observar as baterias YCI, CDU, BTO 2, todas com suspensões ainda muito precoces, convergindo sua degradação de forma ascendente ao longo do tempo. Portanto, neste caso, dados incompletos de vida de uma bateria (suspensões) devem ser eliminados, pois induzem a erros de estimativas.



Figura 18: Degradação x Tempo (Baterias que não atingiram o limite crítico de degradação)

Fonte: Arquivo próprio.

Através do gráfico da Figura 18, é possível observar que, com apenas alguns poucos pontos coletados no início da vida de cada bateria, a tendência estimada pelo software nunca atingirá o limite crítico. Para evitar tais erros, é necessário que se excluam as amostras cujas curvas de degradação obtidas através da extrapolação de seus dados não tenham atingido o limite crítico, resultando apenas nas amostras contidas no Quadro 3, a seguir.

Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria	Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria
1	0,9719	ARV 1	1	1,1818	SAN 2
21	0,916	ARV 1	62	1,005	SAN 2
88	0,8712	ARV 1	109	1,1034	SAN 2
136	0,86	ARV 1	155	0,9444	SAN 2
178	0,7136	ARV 1	203	0,9765	SAN 2
1	0,9771	ARV 2	228	0,9166	SAN 2
21	0,944	ARV 2	239	0,9542	SAN 2
88	0,9221	ARV 2	266	0,2984	SAN 2
136	0,9559	ARV 2	67	1,0482	TTE 1
178	0,8783	ARV 2	114	0,9962	TTE 1

(Continua)

Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria	Tempo (mês)	RCP (% da capacidade nominal)	Bateria
203	0,7136	ARV 2	148	1,2675	TTE 1
2	1,0244	BTO 1	220	1,0156	TTE 1
3	1	BTO 1	246	0,2209	TTE 1
15	1	BTO 1	4	1,2207	VMN 2
27	1,2259	BTO 1	52	1,0101	VMN 2
39	1,1666	BTO 1	88	1,0895	VMN 2
50	1,2408	BTO 1	184	1,1254	VMN 2
89	1,1388	BTO 1	244	0,9823	VMN 2
101	1,0492	BTO 1	267	0,0818	VMN 2
126	1,1737	BTO 1	1	1,1598	WCD
136	1,0555	BTO 1	49	1,1366	WCD
148	1,1666	BTO 1	97	1,0246	WCD
159	1,1187	BTO 1	202	0,7399	WCD
172	1,1597	BTO 1	1	1,2222	WLU
184	1,2016	BTO 1	48	0,9881	WLU
196	1,0619	BTO 1	97	1,0183	WLU
208	0,8835	BTO 1	102	0,7804	WLU
255	0,7094	BTO 1	1	1,2459	WPS
2	0,9784	CON 1	49	1,1261	WPS
54	0,9444	CON 1	95	0,9823	WPS
101	0,9444	CON 1	143	0,9223	WPS
148	0,7136	CON 1	215	0,6703	WPS
2	0,9784	CON 2	1	1,205	WVM
5	1	CON 2	50	1,006	WVM
54	1	CON 2	98	1,2296	WVM
101	0,9722	CON 2	147	1,0749	WVM
148	0,3842	CON 2	191	1,0156	WVM
1	1,1928	SAN 1	240	0,2485	WVM
62	1,0166	SAN 1	3	1,1406	YCE
109	1,0696	SAN 1	61	1,0369	YCE
155	1,0619	SAN 1	107	1,0571	YCE
203	1,0041	SAN 1	157	1,1111	YCE
227	0,9277	SAN 1	203	0,9335	YCE
240	0,8951	SAN 1	226	0,7115	YCE
266	0,1637	SAN 1			

Quadro 3: Degradação x Tempo - Dados completos até o limite crítico

Fonte: Arquivo próprio.

O novo gráfico da degradação, agora, em função apenas dos dados do Quadro 3 é apresentado a seguir:

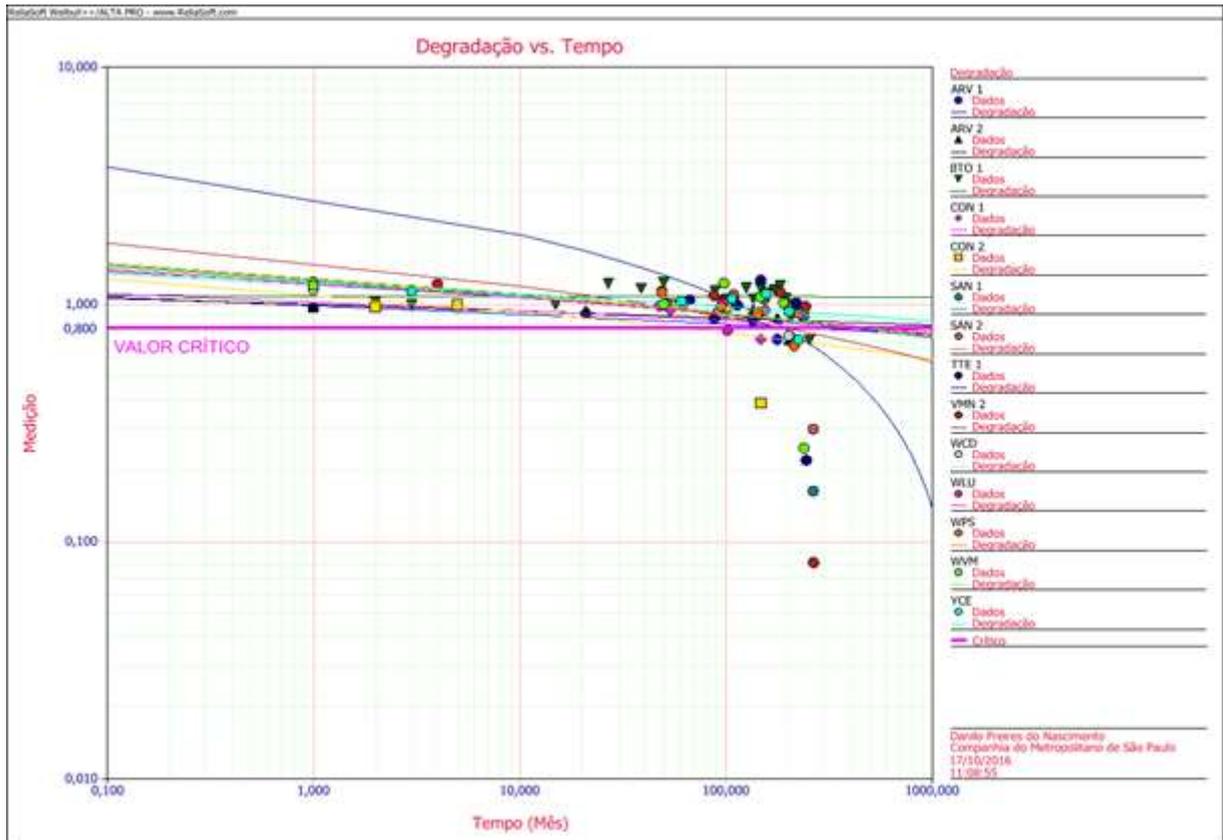


Figura 19: Degradação x Tempo - Dados completos até o limite crítico

Fonte: Arquivo próprio.

Os dados de vida podem, neste caso, projetar a vida útil para tempos de vida extremamente altos, isso devido ao caso especial de degradação deste tipo de bateria, que é crescente no início da vida e decrescente a partir do primeiro ou segundo ano (vide Figura 4, p. 24). Quanto maior o número de medições e quanto mais distribuídos ao longo de toda a vida da bateria, mais fiel à degradação será a extrapolação dos dados.

Por exemplo, YCE, que teve sua vida operacional estimada em 2505,18 meses (mais de 208 anos), como visto no Quadro 4, o que é, realmente, algo extremamente improvável de acontecer na realidade.

Tipo de Relatório	Tempos Extrapolados de Falha/Suspensão		
Informações do Usuário			
Usuário	Danilo Freires do Nascimento		
Empresa	Companhia do Metropolitano de São Paulo		
Data	17/10/2016		
Tempos			
	F/S	Tempo até F/S	Item ID
	F	217,1858574	ARV 1
	F	1794,497823	ARV 2
	F	9,75E+78	BTO 1
	F	472,7762011	CON 1
	F	58,54672059	CON 2
	F	375,9997791	SAN 1
	F	471,5625998	SAN 2
	F	189,2672681	TTE 1
	F	186,6694526	VMN 2
	F	1434,35351	WCD
	F	491,4564046	WLU
	F	428,7600723	WPS
	F	430,5206263	WVM
	F	2505,180012	YCE

Quadro 4: Tempos extrapolados de Falha/Suspensão

Fonte: Arquivo próprio.

A partir destes dados, é possível visualizar, através do software, a extrapolação dos dados de condição das baterias até atingirem o valor crítico (0,8). Nota-se que todas as vidas foram projetadas para um tempo muito superior ao da vida real de cada bateria, O modelo de degradação sugerido pelo Assistente de Modelo de Degradação do Weibull++ é o Logarítmico, e, não se ajusta bem à curva característica da vida de uma bateria, como apresentado no gráfico da Figura 20.

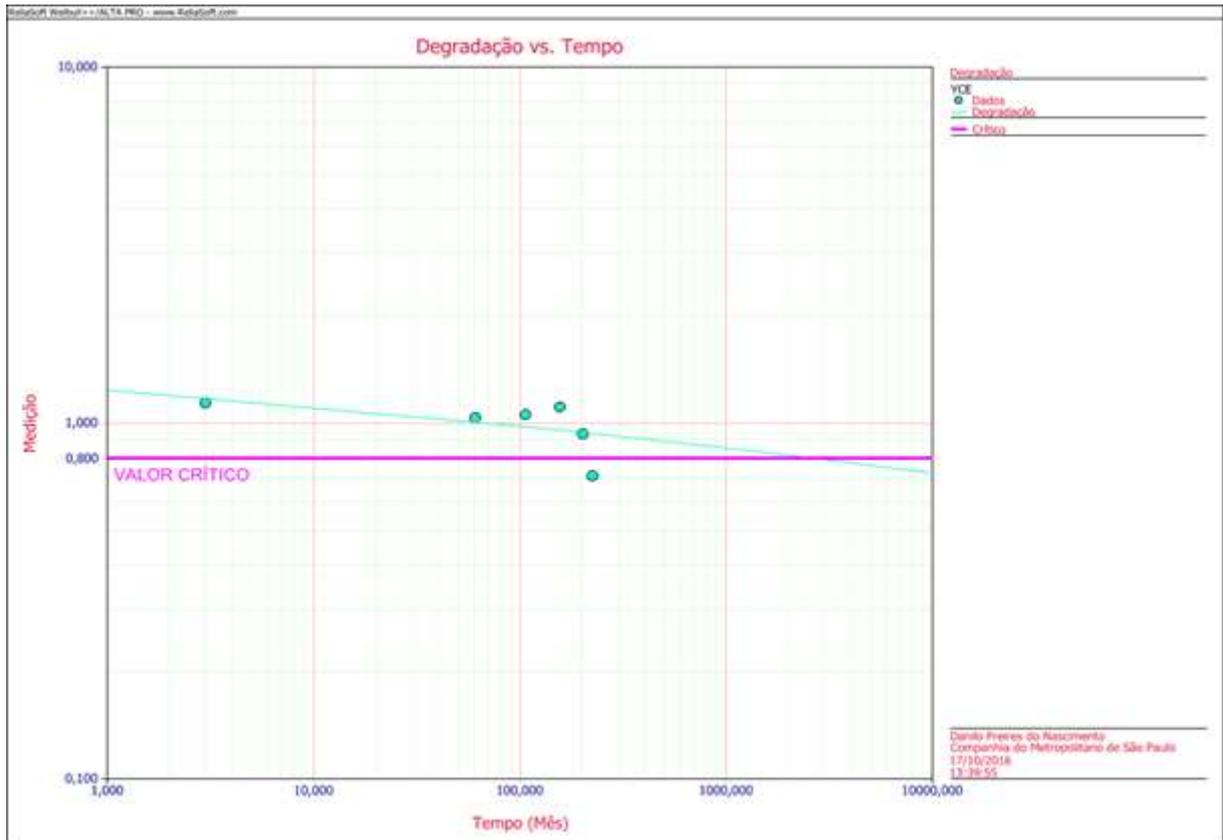


Figura 20: Exemplo de erro de estimativa dos dados (1)

Fonte: Arquivo próprio.

Como é possível observar, na realidade, a bateria de YCE atingiu o limite crítico no tempo $203 \leq t \leq 226$ meses e não em $t = 2505,18$ meses, como foi estimado pelo software (Gráfico da Figura 20). Para estimar a vida útil de cada bateria com maior precisão, um recurso prático é a eliminação de alguns pontos de degradação iniciais, deixando ao menos dois, um acima e outro abaixo do limite de degradação. Ao se proceder desta maneira, a estimativa da vida se torna muito mais próxima da real (Figura 21). Isso implica em eliminar as baterias que não atingiram o limite de 0,8, mas ainda assim, manter uma amostra representativa da população, com 14 baterias.

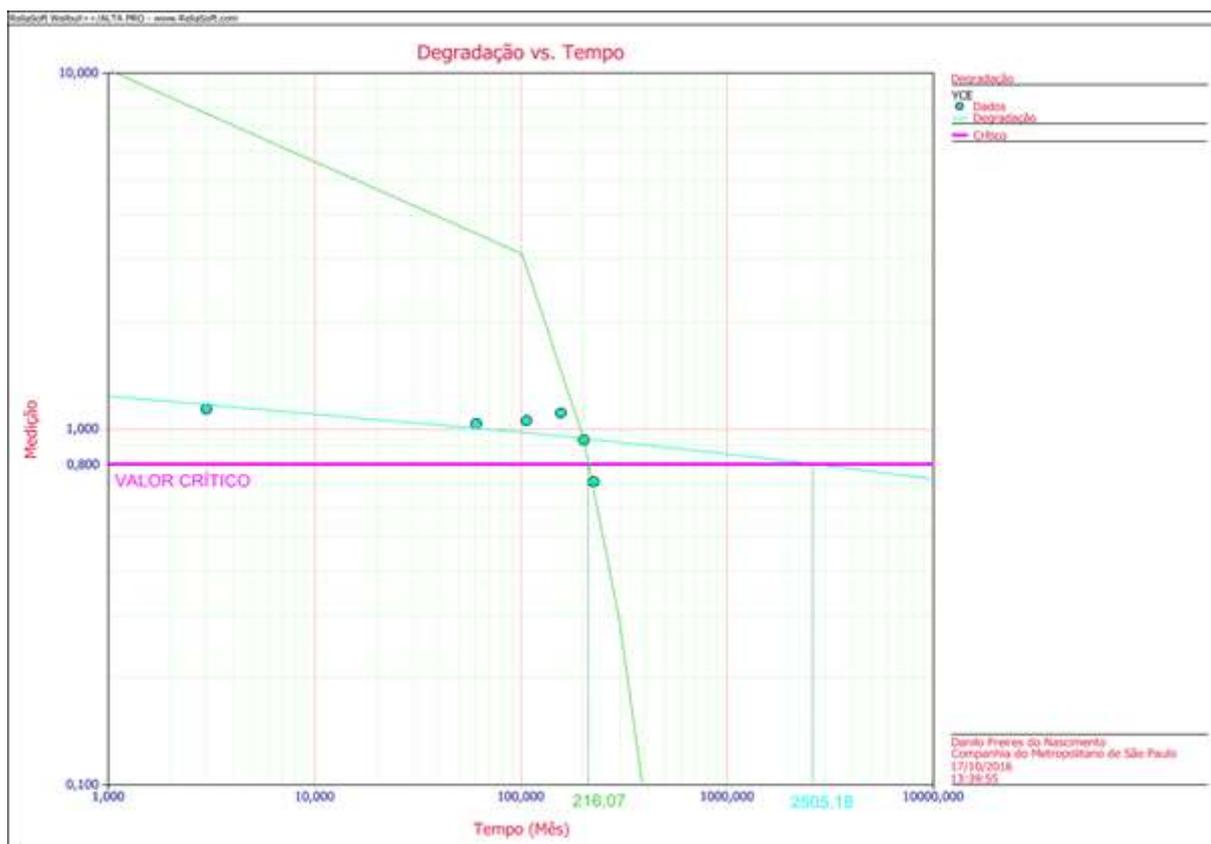


Figura 21: Exemplo de erro de estimativa dos dados (2)

Fonte: Arquivo próprio.

É relativamente comum que, no primeiro ensaio de capacidade, baterias chumbo-ácidas de capacidade nominal na faixa aqui representada (entre 100 e 350 Ah) apresentem valores de capacidade inicial acima da nominal, por exemplo, uma bateria de 100 Ah, apresentando 130 % de capacidade. O contrário também pode ocorrer.

Devido à grande variabilidade entre os resultados dos testes do primeiro ensaio de capacidade de cada bateria, faz-se necessário normalizarem-se todos os demais resultados de cada banco em função do primeiro teste, considerando o resultado deste primeiro teste como sendo a capacidade real da bateria. Após este novo cálculo das capacidades dos testes, referenciando-se à capacidade real da bateria, e não à nominal, obtêm-se os valores apresentados no Quadro 5, a seguir.

Tempo (mês)	RCP (da capacidade real)	Bateria	Tempo (mês)	RCP (da capacidade real)	Bateria
136	0,8848	ARV 1	220	0,9688	TTE 1
178	0,7342	ARV 1	246	0,2107	TTE 1
178	0,8988	ARV 2	244	0,8047	VMN 2
203	0,7303	ARV 2	267	0,0670	VMN 2
208	0,8624	BTO 1	97	0,8834	WCD
255	0,6925	BTO 1	202	0,6379	WCD
101	0,9652	CON 1	97	0,8331	WLU
148	0,7293	CON 1	102	0,6385	WLU
101	0,9936	CON 2	143	0,9038	WPS
148	0,3926	CON 2	215	0,7884	WPS
240	0,8418	SAN 1	191	0,8428	WVM
266	0,7777	SAN 1	240	0,2062	WVM
239	0,8074	SAN 2	203	0,8184	YCE
266	0,2524	SAN 2	226	0,6237	YCE

Quadro 5: Degradação x Tempo

Fonte: Arquivo próprio.

Feitas as considerações e correções apresentadas, observa-se uma melhora na apresentação do gráfico da degradação em função do tempo (Figura 22) se comparado com o gráfico inicial (Figura 17).

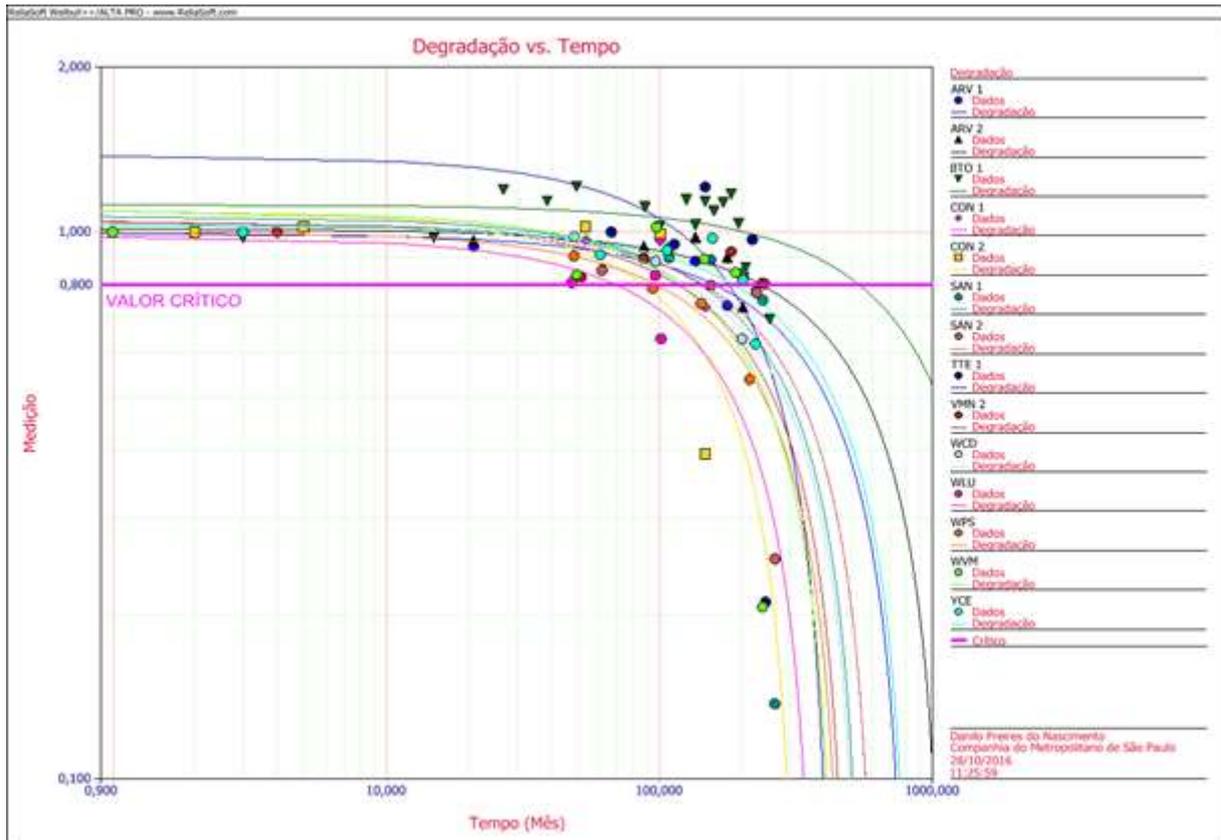


Figura 22: Gráfico da degradação x Tempo (1)

Fonte: Arquivo próprio.

Aplicando-se novamente o recurso de se suprimir os pontos de medição do RCP iniciais da vida das baterias, chega-se ao gráfico da degradação apresentado na Figura 23, em que o Weibull++ realiza a extrapolação dos dados até a falha com maior precisão.

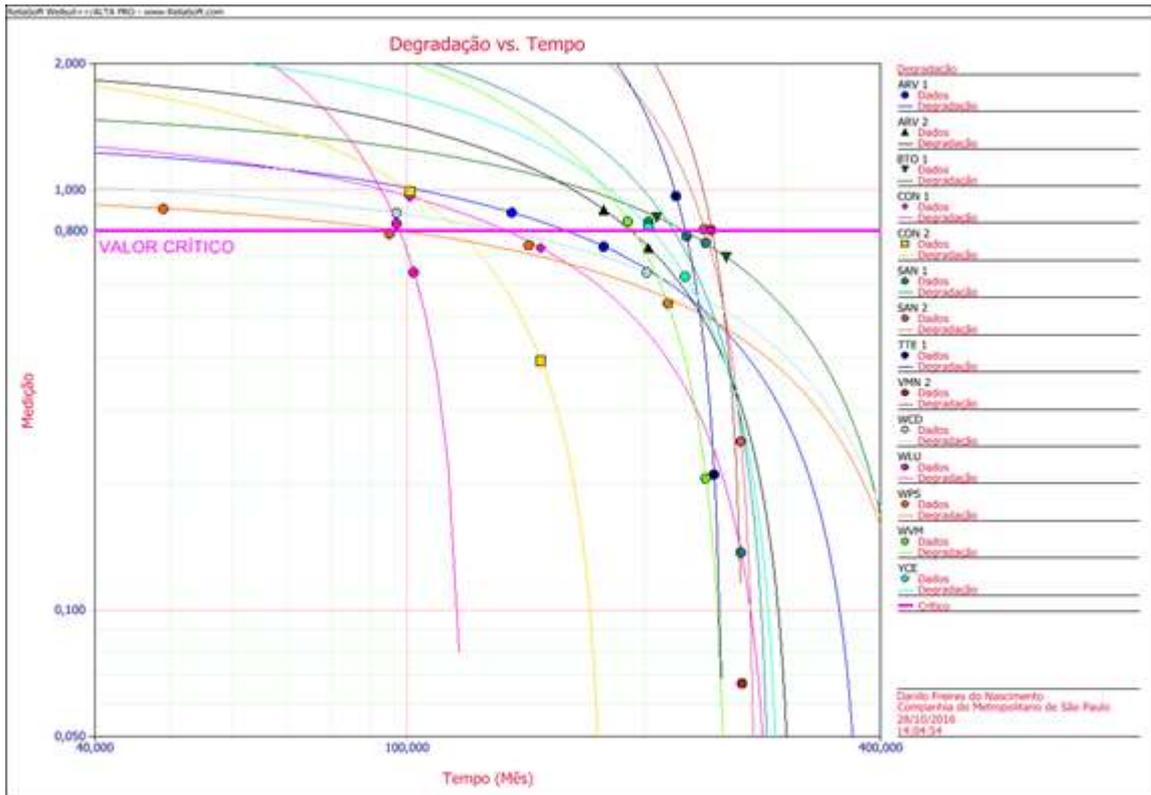


Figura 23: Gráfico da degradação x Tempo (2)

Fonte: Arquivo próprio.

Os dados apresentados no Quadro 6 são os tempos até falha que melhor representam a vida das baterias chumbo-ácidas instaladas no Metrô-SP, que já atingiram seu final de vida útil.

Relatório de Resultados Simplificado			
Tipo de Relatório	Tempos Extrapolados de Falha/Suspensão		
Informações do Usuário			
Usuário	Danilo Freires do Nascimento		
Empresa	Companhia do Metropolitano de São Paulo		
Data	28/10/2016		
Tempos			
	F/S	Tempo até F/S	Item ID
	F	159,6622951	ARV 1
	F	192,6660595	ARV 2
	F	225,2720276	BTO 1
	F	133,9244367	CON 1
	F	116,1455102	CON 2
	F	218,1684696	SAN 1
	F	239,3606588	SAN 2
	F	225,7921731	TTE 1
	F	244,1466074	VMN 2
	F	132,6859852	WCD
	F	97,85203867	WLU
	F	98,50478712	WPS
	F	194,2960501	WVM
	F	205,1777477	YCE
Fim do Relatório de Resultados Simplificado			

Quadro 6: Relatório de tempos até a falha

Fonte: Arquivo próprio.

Agora pode-se levantar as curvas da função de confiabilidade, representada por $R(t)$, função densidade de probabilidade (*pdf*), representada por $f(t)$ e função de distribuição cumulativa (*cdf*), representada por $F(t)$.

Se T é uma Variável Aleatória Contínua, então a função densidade de probabilidade é a função $f(t)$ para o intervalo $[a, b]$, tal que $a < b$.

$$P(a \leq T \leq b) = \int_a^b f(t) dt$$

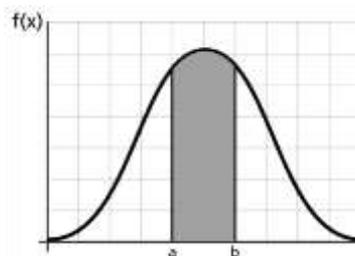


Figura 24: Função Densidade de Probabilidade (pdf)

Fonte: http://www.reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background. Acesso em: 09 set. 2016.

Para qualquer instante t , a área sob a curva no intervalo $[0, t]$ indica a probabilidade da variável aleatória T (tempo até a falha) pertencer ao intervalo $[0, t]$, ou seja, indica a probabilidade de uma bateria atingir o limite crítico neste intervalo (RELIASOFT..., 2016).

O gráfico da função densidade de probabilidade de falha da amostra é mostrado na Figura 25.

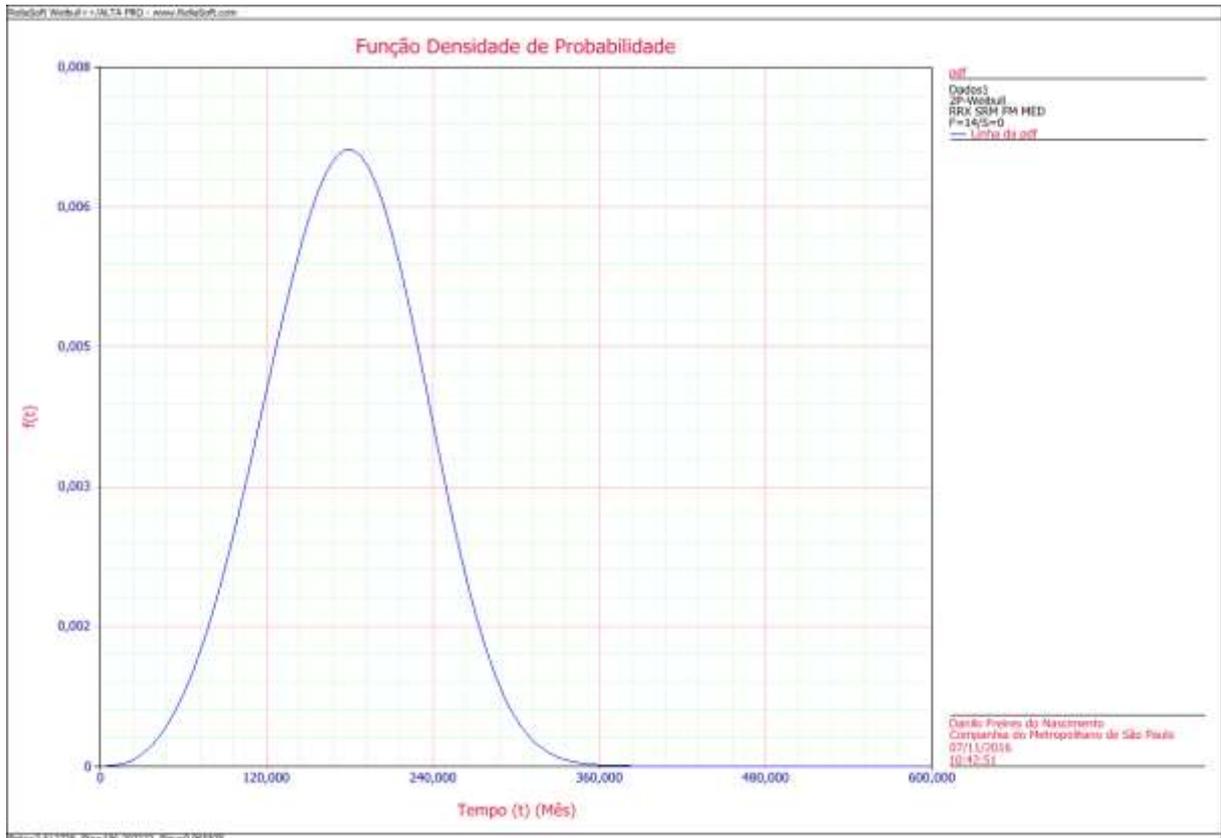


Figura 25: Função Densidade de Probabilidade de falha das Baterias Chumbo-ácidas

Fonte: Arquivo próprio.

A função de distribuição cumulativa (cdf) representa os valores acumulados da pdf , ou seja, a cdf é a área sob a $f(t)$ até um valor a . A área total sob o pdf é sempre igual a 1. A de um ponto na curva da cdf é igual à área sob a curva à esquerda desse ponto na pdf (RELIASOFT..., 2016). Em confiabilidade, a cdf é usada para medir a probabilidade do item em questão falhar antes do valor de tempo associado, e também é chamada de **probabilidade de falha** $F(t)$.

$$F(t) = P(T \leq a) = \int_0^a f(s) ds$$

A Figura 26 ilustra a relação entre os gráficos da *pdf* e da *cdf*.

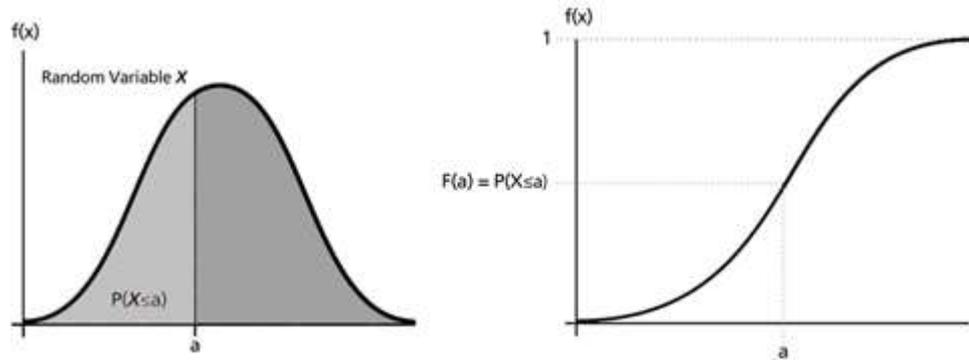


Figura 26: Relação entre a pdf e a cdf

Fonte: Adaptado de http://www.reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background. Acesso em: 09 set. 2016.

O gráfico da função de distribuição cumulativa da amostra avaliada é mostrado na Figura 27.

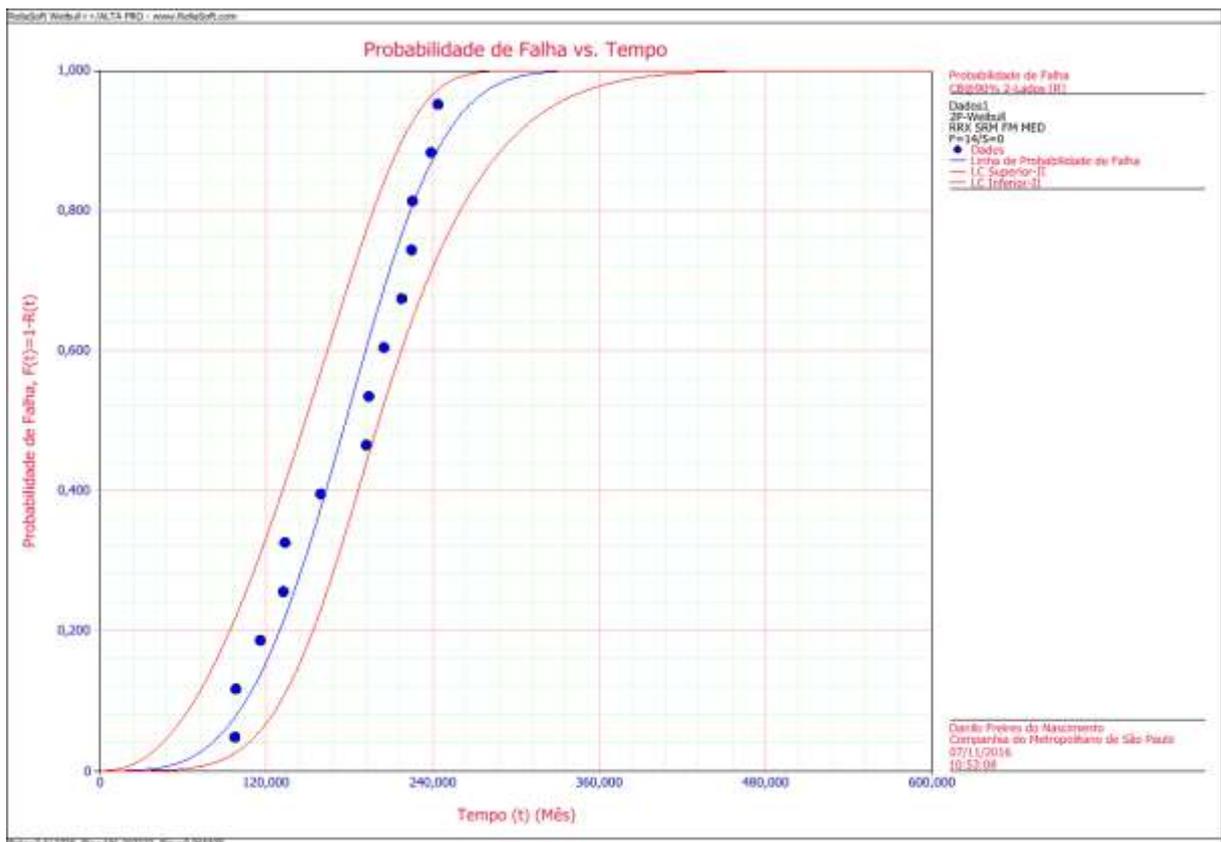


Figura 27: Função Acumulada de Probabilidade de falha das Baterias Chumbo-ácidas

Fonte: Arquivo próprio.

A função de confiabilidade $R(t)$ é a probabilidade acumulada de sucesso do item. O valor de um ponto na curva da $R(t)$ representa a área sob a curva à esquerda desse ponto na pdf (Figura 28). Ao contrário da cdf , a função de confiabilidade é usada para medir a probabilidade de do item em questão manter-se funcional até o valor de tempo associado (RELIASOFT..., 2016).

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T \geq a) = \int_a^{\infty} f(s)ds$$

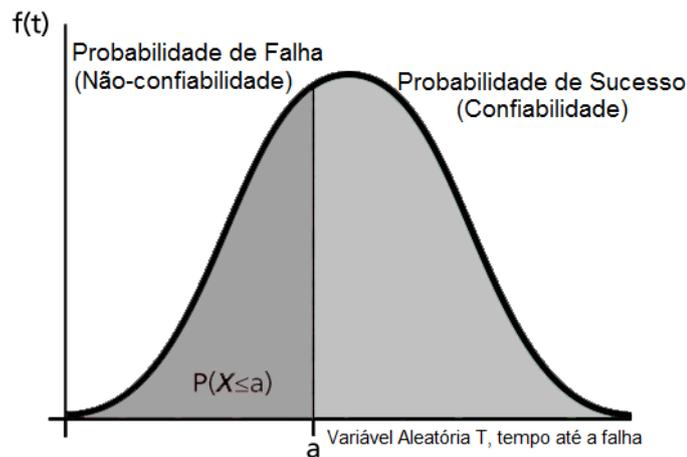


Figura 28: Relação entre a cdf e a confiabilidade

Fonte: Adaptado de http://www.reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background. Acesso em: 09 set. 2016.

O gráfico da função de confiabilidade da amostra avaliada é mostrado na Figura 29 a seguir.

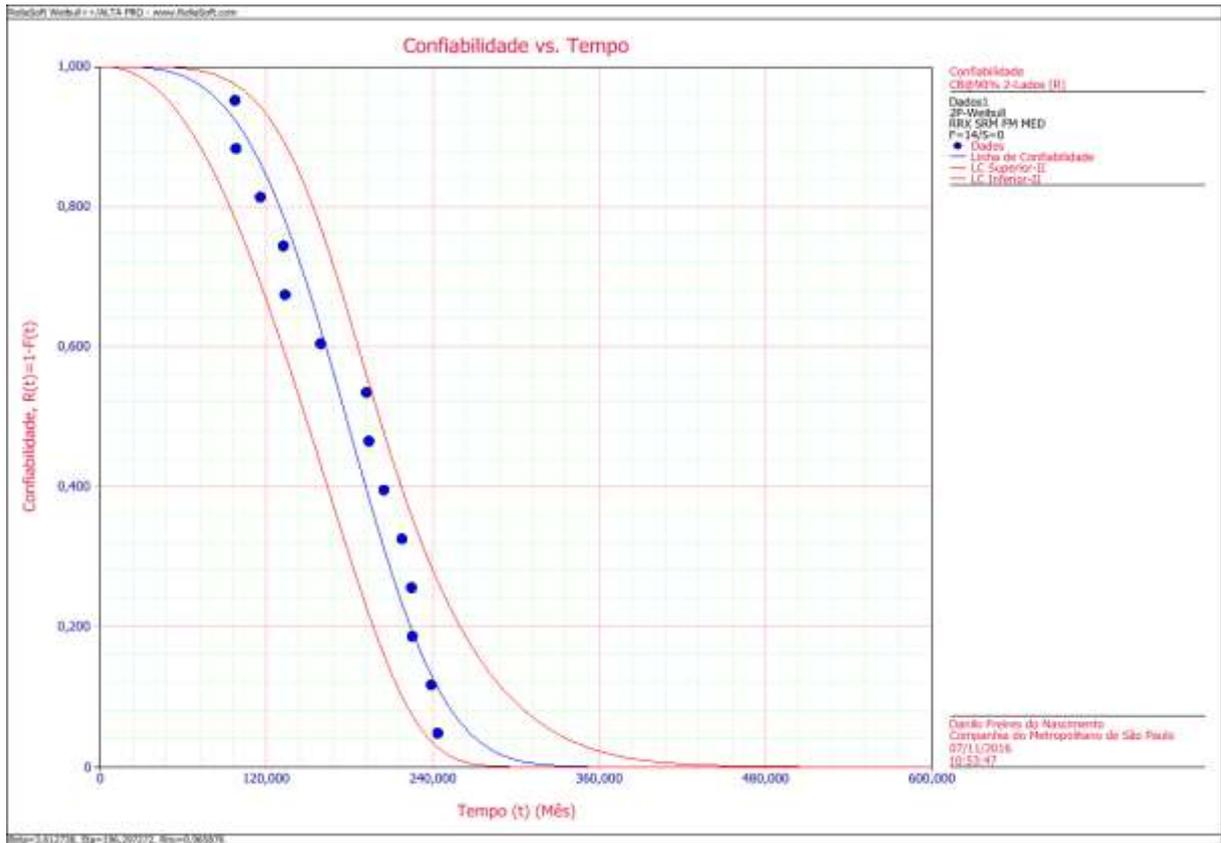


Figura 29: Função da Confiabilidade x Tempo das baterias Chumbo-ácidas

Fonte: Arquivo próprio.

No programa Weibull++ é possível visualizar os tempos em que as unidades atingem o nível crítico de degradação, mediante a interpolação dos dados de degradação feita pelo próprio programa. No painel de controle, em **Resultados de degradação (...)**, na janela Resultados, o relatório mostra um resumo da análise.

Relatório de Resultados Simplificado		
Tipo de Relatório	Resultados do Gráfico	
Informações do Usuário		
Usuário	Danilo Freires do Nascimento	
Empresa	Companhia do Metropolitano de São Paulo	
Data	07/11/2016	
Parâmetros		
Distribuição:	Weibull-2P	
Análises:	RRX	
Método do IC:	FM	
Rankeando:	MED	
Beta	3,612738	
Eta (Mês)	196,297272	
Valor da LK	-74,723979	
Rho	0,965876	
F \ S	14 \ 0	
LOCAL VAR/COV MATRIX		
	Var-Beta=0,667690	CV Eta Beta=2,384928
	CV Eta Beta=2,384928	Var-Eta=232,297790
Fim do Relatório de Resultados Simplificado		

Quadro 7: Relatório de Resultados da Análise do Weibull++

Fonte: Arquivo próprio.

3.2.4 Determinação da Vida Média

A vida média pode ser determinada a partir da análise dos dados de degradação das baterias, realizadas com o auxílio do Software Reliasoft Weibull++/ALTA PRO. Este software dispõe de uma calculadora chamada QCP (*Quick Calculation Pad*), que foi utilizada para o cálculo da vida média das baterias, com nível de confiança de 95 %:

$$MTTF = 176,91 \text{ meses}$$

3.2.5 Determinação do tempo médio de aquisição de baterias

O processo de compra de baterias estacionárias compõe-se das seguintes etapas:

- Apuração dos resultados dos ensaios de capacidade de todas as baterias;
- Relação das baterias cuja capacidade está inferior a 80 % da sua capacidade nominal;
- Comunicação interna ao setor de Logística para aquisição de sobressalentes;

- Processo de pregão eletrônico para escolha do fornecedor;

Anualmente, a equipe de monitoramento da condição de equipamentos faz o levantamento de todas as baterias que se encontram com capacidade inferior a 80 % da nominal, ou seja, abaixo do limite inferior do RCP.

Uma lista com todas as baterias degradadas é encaminhada ao Departamento de manutenção de sistemas, que toma conhecimento e encaminha à Gerência de Logística para dar continuidade ao processo de compra. A gerência, por sua vez, inicia um processo de licitação para aquisição deste material, uma vez que o Metrô-SP é uma sociedade de economia mista.

O Quadro 8 a seguir mostra os últimos tempos de aquisição de baterias estacionárias, desde o levantamento das necessidades até o recebimento do material.

Ano	Data início	Data fim	Tempo de compra
2015	16/09/2015	27/10/2016 (em andamento)	407 dias
2014	03/11/2014	22/07/2015	261 dias
2014	12/09/2014	22/07/2015	313 dias
2014	25/08/2014	22/07/2015	331 dias
2013	23/12/2013	22/07/2015	576 dias
2013	13/12/2013	22/07/2015	586 dias
2012	-	-	-
2011	15/02/2011	31/07/2013	897 dias

Quadro 8: Tempos de aquisição de baterias

Fonte: Arquivo próprio.

A partir dos dados do Quadro 8, o tempo médio de aquisição (T_{aq}) de baterias atualmente é de 481,57 dias (1 ano, 3 meses e 26 dias).

$$T_{aq} = 481,57 \text{ dias}$$

$$T_{aq} = 15,88 \text{ meses}$$

3.2.6 Determinação do intervalo P-F e do FDT

Por ser a bateria um item cujo parâmetro relevante da condição é detectável em toda a vida útil do equipamento, o ponto P do intervalo P-F pode ser posicionado em qualquer momento da vida, porém algumas considerações devem ser feitas:

Segundo Moubray (2003, p. 148), o intervalo P-F residual deve ser maior do que o tempo requerido para tomar a ação de evitar ou reduzir as consequências da falha, que, no caso deste estudo, este tempo envolve: periodicidade da solicitação de compra, tempo de aquisição, tempo de instalação.

Se o ponto P da curva P-F é o momento em que é possível detectar-se a aproximação da falha funcional e a detecção da falha potencial deve ocorrer em tempo hábil de se corrigir esta falha antes que se perca a função, logo, no caso das baterias, o intervalo P-F deve ser superior à soma dos períodos de pedido de compra, tempo de aquisição, programação e instalação da bateria. Além disso, quando uma bateria atingir o ponto P da curva, o pedido de compra para sua substituição deve ser feito impreterivelmente na próxima solicitação de compra.

$$C_{\text{alarme}} = f(t = (MTTF - T_{\text{aq}} - P_{\text{sol. compra}}))$$

Onde: $P_{\text{sol.compra}} = 12 \text{ meses}$

$$C_{\text{alarme}} = f(t = (176,91 - 15,88 - 12))$$

$$C_{\text{alarme}} = f(t = 149,03)$$

Há duas maneiras de se determinar a Capacidade de alarme (o ponto P da curva P-F). A primeira maneira é identificar-se a Medição correspondente ao tempo $t = 149,03$, no gráfico da degradação com todas as medições de todas as baterias, atribuindo-se a mesma identificação (Item ID) a todas elas.

O gráfico da Figura 30 apresenta o valor da Capacidade da bateria que corresponde ao tempo de 149,03 meses, que é de 93 %. Isto significa que toda bateria que apresentar medição abaixo de 93 % da capacidade real deve ser solicitada a compra de uma bateria de reposição no ciclo de compra subsequente.

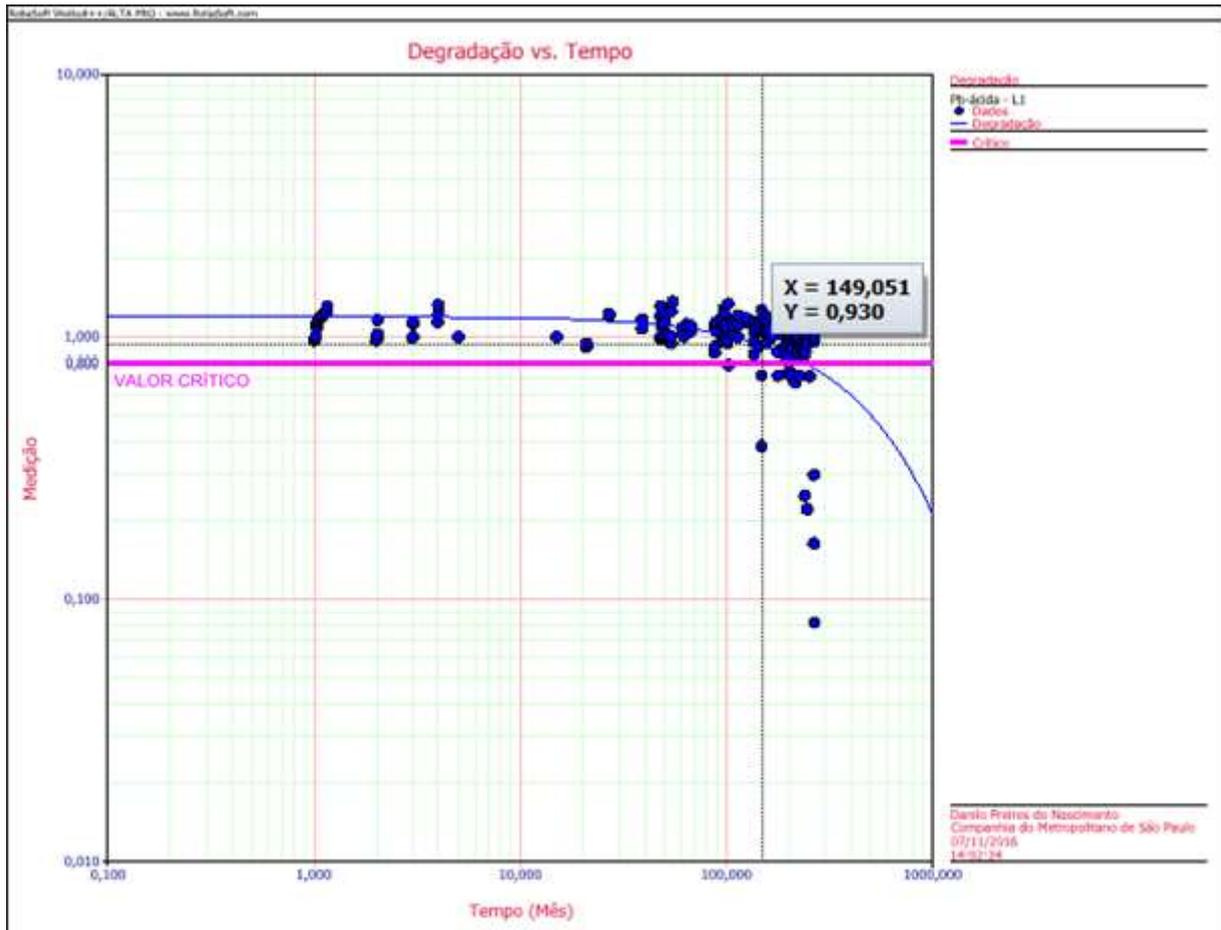


Figura 30: Determinação da Capacidade de Alarme através do gráfico de degradação

Fonte: Arquivo próprio.

$$C_{\text{alarme}} = 93 \%$$

A segunda maneira envolve calcular-se a confiabilidade de um item no tempo de operação $t = 149,03$, com o auxílio do QCP do Weibull++, como mostra a Figura 31 a seguir.

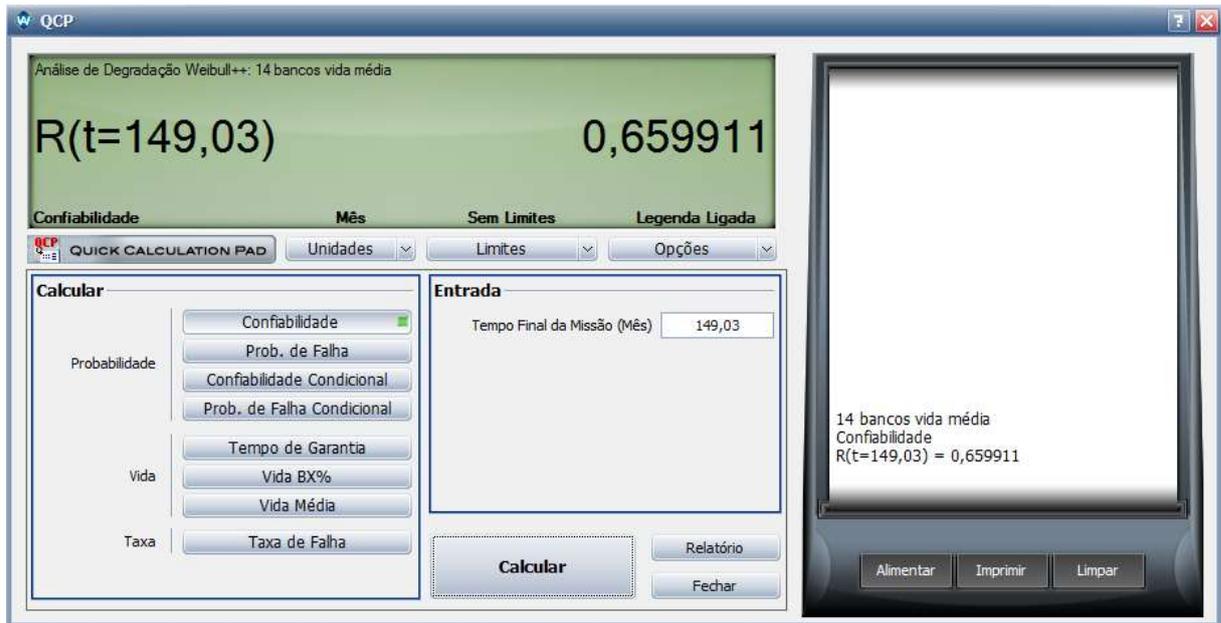


Figura 31: Determinação da Capacidade de Alarme através do cálculo da confiabilidade

Fonte: Arquivo próprio.

$$R(t = 149,03) = 65,99 \%$$

Feito isso, calcula-se a proporção entre esta confiabilidade e o range de 80 % a 100 % que corresponde à vida útil da bateria.

$$C_{alarme} = (0,6599 \cdot 20 \%) + 80 \%$$

$$C_{alarme} = 93,132 \%$$

Observa-se que ambos os métodos resultaram em uma Capacidade de alarme de 93 %.

3.2.7 Determinação do intervalo P-F e do FDT

O procedimento para se determinar o intervalo P-F e o FDT das baterias foi obtido da seguinte forma: preencher a coluna **Failure Time (F)** da Tabela 1 com os tempos até a falha obtidos pela análise de degradação do Weibull++, considerando-se o **valor limite de 0,8 (80 %)**. Em seguida, preencher a coluna **Warning (P)**, com os tempos até a falha obtidos pela

análise de degradação do Weibull++, considerando-se o **valor limite de 0,93 (93 %)**, pois é a capacidade de alarme, calculada anteriormente. Os tempos da coluna **P-F Interval** são iguais à diferença entre os tempos P e F. O **FDT** é a razão entre os tempos P e F.

ID da Unidade	Perigo (P)	Tempo até Falha (F)	Intervalo P-F	FDT
ARV 1	82,7554648	158,692092	75,9366272	0,521484491
ARV 2	147,0017054	192,030098	45,0283926	0,76551388
BTO 1	178,5912969	224,0982313	45,5069344	0,796933094
CON 1	109,8918346	132,4937791	22,6019445	0,829411278
CON 2	93,69132508	111,9747789	18,28345382	0,836718107
SAN 1	164,0103644	217,9518674	53,941503	0,752507268
SAN 2	157,2176461	239,2142198	81,9965737	0,657225336
TTE 1	221,4654771	223,2646253	1,7991482	0,991941633
VMN 2	176,5861908	244,0542292	67,4680384	0,723553086
WCD	78,26100581	128,9952606	50,73425479	0,606696753
WLU	64,55713464	97,76340035	33,20626571	0,66034052
WPS	47,27825288	95,23582993	47,95757705	0,496433463
WVM	144,355343	192,8149231	48,4595801	0,748673083
YCE	144,8669387	204,9288909	60,0619522	0,706913203
		Valor médio	46,64158898	0,721024657

Tabela 1: Resultados P e F para cada bateria observada junto com o intervalo P-F e o FDT calculados

Fonte: Arquivo próprio.

O intervalo P-F deste modo de falha também pode ser obtido pelo produto do tempo médio até a falha e o complemento do FDT médio.

3.2.8 Obtendo o tempo ótimo entre inspeções

“Tarefas sob-condição devem ser efetuadas em intervalos menores do que o intervalo P-F.” (MOUBRAY, 2003, p. 146). Portanto, considera-se o tempo ótimo entre inspeções como sendo a metade do intervalo P-F (46,64 meses).

$$Int. \text{ entre inspeções} = \frac{46,64 \text{ meses}}{2} = 23,32 \text{ meses}$$

Por uma questão de facilidade de planejamento destas atividades, buscaremos aproximá-lo de uma periodicidade mais conveniente, logo:

$$\text{Intervalo entre inspeções} = 2 \text{ anos}$$

Isto significa que os testes de capacidade devem ser efetuados a cada 2 anos a fim de se detectar o momento mais adequado de se antecipar o pedido de compra da bateria de reposição. No entanto, a primeira inspeção pode ser efetuada com um tempo de vida maior, em função da não observação de mortalidade infantil neste produto (Baterias com defeitos de fabricação ou má formação são detectadas nos testes de aceitação em fábrica e em campo).

Após o teste em fábrica e o teste de aceitação em campo no momento da instalação, com uma confiabilidade próxima a 95 %, o próximo ensaio de capacidade pode ser realizado apenas aos 7 anos de vida da bateria, e os demais testes, a cada 2 anos, até sua substituição. Entre os ensaios devem ser feitas as inspeções de rotina para que sejam inspecionados outros modos de falha. É desejável que se adote a medição da condutância interna dos elementos como forma adicional de se detectar a falha potencial.

A confiabilidade das baterias decorridos 84 meses (7 anos) de vida é de aproximadamente 95 % (vide Figura 32), o que justifica a realização do primeiro teste neste período.

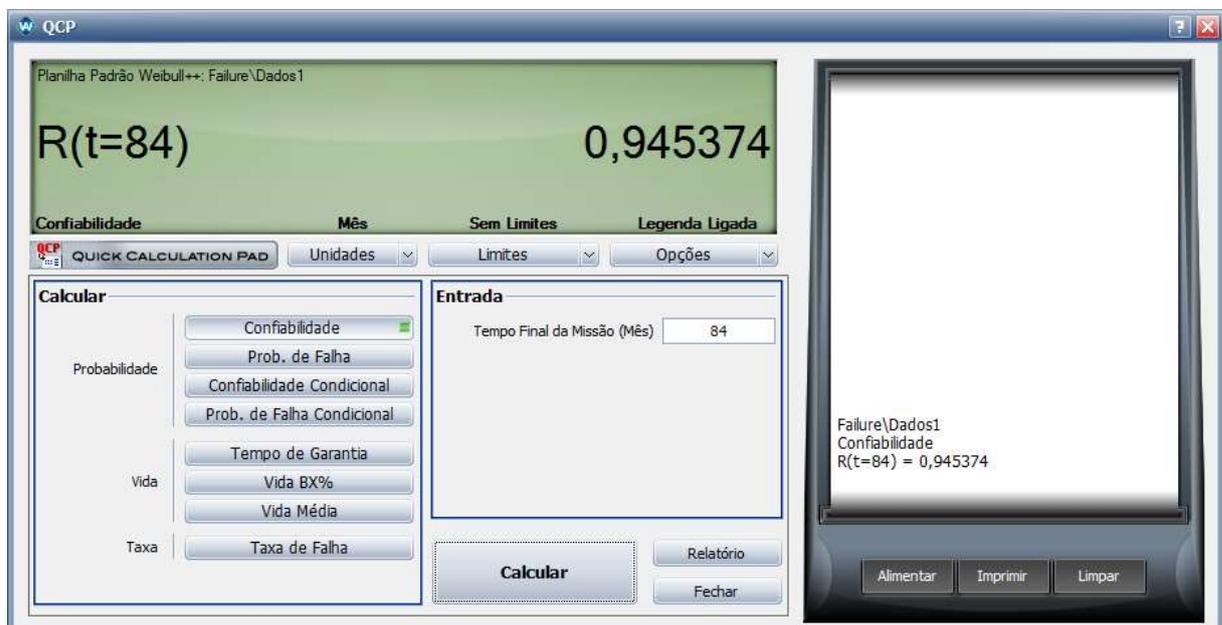


Figura 32: Confiabilidade esperada da bateria após 7 anos de operação

Fonte: Arquivo próprio.

Esta análise demonstra as vantagens de se analisar a degradação de equipamentos antes de se definir os tempos entre inspeções. Este método, embora necessite de um levantamento prévio de dados de degradação, é útil na fase de planejamento da manutenção, com impactos relevantes na redução de custos e/ou risco.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou brevemente as características construtivas, de operação e de manutenção das baterias chumbo-ácidas estacionárias ventiladas. Devido sua extrema importância para continuidade de serviços prestados pelo Metrô de São Paulo durante situações de falta de energia da concessionária, panes ou manobras elétricas nas subestações, as baterias foram escolhidas para ser o objeto deste estudo.

Buscou-se dialogar diversos autores sobre temas de manutenção centrada na confiabilidade, em especial, a análise de deterioração, explorando-se termos como o Limiar de detecção de falha (FDT), o Intervalo P-F e Intervalo P-F residual, para a determinação do melhor intervalo entre inspeções; do parâmetro relevante da condição (RCP), que representa fielmente a condição do item e, conseqüentemente, sua confiabilidade; além da Manutenção centrada na Confiabilidade (MCC), para a determinação da melhor estratégia de manutenção para o item.

Os objetivos envolviam a determinação de tempos entre inspeções, ensaios e de solicitação de compra, com base nas distribuições de probabilidades dos itens amostrados. Estes parâmetros foram estimados conforme mostra o resumo dos resultados apresentados a seguir:

$$Vida\ média = 176,91\ meses$$

$$Tempo\ médio_{aquisição} = 15,88\ meses$$

$$C_{alarme} = 93\ \%$$

$$C_{crítica} = 80\ \%$$

$$Intervalo\ P - F = 46,641\ meses$$

$$FDT = 0,721\ (72,1\ \%)$$

$$Intervalo\ dos\ testes = 23,32\ meses \cong 2\ anos$$

$$Tempo\ até\ 1^{\circ}\ teste\ de\ capacidade = 7\ anos$$

As principais dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho foram a tomada de decisão sobre quais tratamentos os dados deveriam submeter-se para que os resultados não fossem prejudicados, e a compilação das abordagens de diferentes autores num só texto, buscando-se encontrar a convergência de suas ideias.

Acredita-se, que a revisão dos planos de manutenção das baterias com base nos dados de confiabilidade apresentados neste estudo trarão ganhos, tais como a redução de custos de mão de obra, energia elétrica e aumento da disponibilidade.

4.1 MELHORIAS FUTURAS

Este estudo pode ser ampliado através da avaliação das baterias das demais Linhas do Metrô-SP, analisando-se a variância existente entre a mantabilidade das baterias de cada linha.

Os resultados dos novos testes de capacidade podem ser utilizados como novos indivíduos da amostra, alcançando-se estimativas ainda mais precisas.

Em caso de adoção da medição de condutância como método de avaliação da vida útil das baterias, pode-se avaliar a sua eficácia, analisando-se as medições e, através de uma análise da variância (ANOVA), ou outro delineamento de experimentos, definir a periodicidade e os níveis de alarme e falha a partir deste novo parâmetro de degradação.

O levantamento dos custos envolvidos no ciclo de vida deste ativo pode ser inserido ao estudo para se analisar sua vida econômica de maneira mais abrangente.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 14198: Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado — terminologia**. Rio de Janeiro, 2016.

CARDOSO, P. E. R. **Estudo de correlação de parâmetros elétricos terminais com características de desempenho em baterias**. 2005. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://unicamp.sibi.usp.br/handle/SBURI/10128>> Acesso em: 29 ago. 2016.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO – METRÔ. **Informações sobre a demanda**. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/metro/numeros-pesquisa/demanda.aspx>>. Acesso em: 20 out. 2016.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. ISBN 978-85-352-3353-7.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **Std 485: Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications**. New York, 2010.

JOHNSON, W. E. **Stationary battery guide: design, application, and maintenance - Revision 2 of TR-100248**. Califórnia: EPRI Project Manager, 2002.

KNEZEVIC, J. **Reliability, maintainability and supportability – a probabilistic approach**. Pennsylvania: Mc Graw-Hill, 2002.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries – 3. ed**. New York: Mc Graw-Hill, 2001. ISBN 0-07-135978-8

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. ISBN 978-85-216-1884-3.

MOUBRAY, J. **Manutenção centrada em confiabilidade – 2. Ed**. Lutterworth, Inglaterra: Aladon Ltd, 2003. ISBN 0-9539603-0-7

PALLEROSI, C. A. **Confiabilidade, a quarta geração da qualidade: conceitos básicos e métodos de cálculo**, vol. 1. São Paulo: Reliasoft Brasil, 2010.

_____. **Confiabilidade, a quarta geração da qualidade: confiabilidade de sistemas**, vol. 4. São Paulo: Reliasoft Brasil, 2010.

RELIABILITY HOTWIRE: THE EMAGAZINE FOR THE RELIABILITY PROFESSIONAL. On-Condition Maintenance Using P-F Interval or Failure Detection

Threshold (FDT). Tucson: Reliasoft Corporation, Issue 76, jun 2007. Disponível em: <<http://www.weibull.com/hotwire/issue76/hottopics76.htm>>. Acesso em: 2 set. 2016.

RELIASOFT CORPORATION. **Reliawiki - Life Data Analysis Reference Book.**

Disponível em: < http://www.reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background>. Acesso em: 9 set. 2016.

SIQUEIRA, I. P. **Manutenção centrada na confiabilidade – manual de implementação.** Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2014. ISBN 978-85-7303-880-4

GLOSSÁRIO

Bateria - conjunto de elementos ou monoblocos interligados eletricamente.

Confiabilidade – Capacidade ou probabilidade de um item continuar exercendo sua função original, por um período especificado e sob condições de operação especificadas.

Deterioração – Degradação na qualidade, confiabilidade ou desempenho funcional de um item devido à idade, uso ou ambiente.

Elemento - conjunto constituído de dois grupos de placas de polaridade opostas, isolados entre si por meio de separadores e/ou distanciadores, imersos no eletrólito dentro do vaso que os contém. O mesmo que acumulador elétrico.

Eletrólito - Substância líquida ou sólida que contém íons móveis, que a tornam ionicamente condutora;

Falha Potencial – Uma condição identificável ou defeito que indica que uma falha funcional está prestes a acontecer ou em processo de evolução.

Inspeção Preditiva (On-Condition) – Uma tarefa programada destinada a detectar uma falha potencial, através da inspeção de um parâmetro.

Intervalo P-F – intervalo entre a ocorrência da falha potencial e seu decaimento até a falha funcional;

Intervalo P-F residual – intervalo mínimo decorrido entre a descoberta da falha potencial e a ocorrência da falha funcional;

Manutenção Baseada em Condição – Uma estratégia de manutenção baseada na medição da condição do equipamento para avaliar se ele irá falhar durante um período futuro, e tomar alguma ação apropriada para evitar as consequências desta falha.