

ANÁLISE DO IMPACTO DA FREQUÊNCIA DE TESTES DOS GERADORES DIESEL
DE EMERGÊNCIA EM ATENDIMENTO À META DE DISPONIBILIDADE DA REGRA
DA MANUTENÇÃO

Fábio Takashi Yoshida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: José de Jesús Rivero Oliva

Rio de Janeiro
Março de 2017

ANÁLISE DO IMPACTO DA FREQUÊNCIA DE TESTES DOS GERADORES DIESEL
DE EMERGÊNCIA EM ATENDIMENTO À META DE DISPONIBILIDADE DA REGRA
DA MANUTENÇÃO

Fábio Takashi Yoshida

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof José de Jesús Rivero Oliva, D.Sc.

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Prof. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2017

Yoshida, Fábio Takashi

Análise do impacto da frequência de testes dos geradores diesel de emergência em atendimento à meta de disponibilidade da regra da manutenção/ Fábio Takashi Yoshida. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 82 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: José de Jesús Rivero Oliva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 56-58.

1. Confiabilidade. 2. Regra da Manutenção. 3. Geradores Diesel de Emergência. I. Oliva, José de Jesús Rivero. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

DEDICATÓRIA

A toda a minha família, em especial aos meus pais Teresa e Eizo por serem os melhores exemplos que poderia ter na vida.

À Samira, por ser meu porto seguro e me incentivar todos os dias a ser melhor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador José de Jesús Rivero Oliva pela dedicação, incentivo e paciência em transmitir seus conhecimentos.

Ao professor Dr. Pedro Saldanha, pelo apoio e pela gentileza em ter me recebido na CNEN para me orientar.

A todos os colegas da Petrobras que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho. Em especial aos colegas Marcus Neves, Rodrigo Vianello, Henrique de Mello e Daniel Akira pelas inestimáveis contribuições.

A todos os professores do Programa de Engenharia Nuclear e especialmente aos de Análise de Segurança, pelos conhecimentos mostrando o quão fascinante é a cultura de segurança na Indústria Nuclear.

A todos os colegas de curso de mestrado do Programa de Engenharia Nuclear pela amizade e convívio.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DO IMPACTO DA FREQUÊNCIA DE TESTES DOS GERADORES DIESEL DE EMERGÊNCIA EM ATENDIMENTO À META DE DISPONIBILIDADE DA REGRA DA MANUTENÇÃO

Fábio Takashi Yoshida

Março/2017

Orientador: José de Jesús Rivero Oliva

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho investiga a hipótese da degradação dos motores diesel dos geradores de emergência, decorrentes dos testes funcionais através da análise de dados de cinco motores diesel de geradores de emergência com diferentes frequências de teste. Além disso, é abordado o regulamento técnico imposto pelo órgão regulador americano *NRC (Nuclear Regulatory Commission)* a respeito de um maior acompanhamento das manutenções de Elementos, Componentes e Estruturas críticos à Segurança da Usina e sua aplicação no contexto dos equipamentos que foram utilizados neste trabalho. Os resultados indicam que os exemplares testados semanalmente possuem uma disponibilidade maior, apesar de sua maior frequência de teste. São feitas também recomendações acerca da forma dos registros no banco de dados de manutenção.

Abstract of Dissertation presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF IMPACT OF THE FREQUENCY OF TESTS OF THE DIESEL
EMERGENCY GENERATORS IN MEETING THE AVAILABILITY GOAL OF THE
MAINTENANCE RULE

Fábio Takashi Yoshida

March/2017

Advisor: José de Jesús Rivero Oliva

Department: Nuclear Engineering

This work investigates the hypothesis of the degradation of the diesel engines of the emergency generators, resulting from the functional tests through the data analysis of five diesel engines of emergency generators with different test frequencies. In addition, it was examined the technical regulation imposed by the US regulatory agency NRC (Nuclear Regulatory Commission) regarding a greater monitoring of the maintenance of elements, components and structures critical to the plant safety and its application in the context of the equipment that was used in this work. The results indicate that the weekly tested samples have a higher availability, despite their higher test frequency. Recommendations are also made about the form of the records in the maintenance database.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Estrutura do trabalho	5
2. Revisão bibliográfica	6
2.1. Tipos de manutenção	6
2.2. Parâmetros de confiabilidade	7
2.3. Períodos característicos de vida de um componente ou sistema	10
2.4. A Regra da Manutenção	11
2.5. O Gerador Diesel de Emergência (GDE)	22
3. Modelo de cálculo de disponibilidade para equipamentos em reserva	33
4. Coleta e Análise de dados de falha de Grupos de Geradores	39
4.1. Metodologia da análise dos dados	39
4.2 Períodos de análise identificados	41
4.3 Análise dos períodos	43
5. Resultados	53
6. Conclusões e Recomendações	57
Referências	58
Apêndice A: Tabelas de cálculo para obtenção de metas na condição de Station Blackout	62
Apêndice B: Gráficos de taxa de falha e probabilidade de falha dos períodos A-2 a E-2	64
Apêndice C: Gráficos da taxa de falha cumulativa e Weibull dos períodos A-2 a E-2 .	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência de eventos que configura o Station blackout.....	2
Figura 2 - Impacto no CDF quando o gerador diesel está indisponível (SAMANTA et al., 1994).....	3
Figura 3 - Curva da banheira (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009).....	11
Figura 4 - Fluxograma da Aplicação da RM (NUMARC, 2011, adaptado).....	15
Figura 5 - Seleção de ESC's dentro do escopo da RM	16
Figura 6 - Estabelecimento de Indicadores de Risco e categorização das ESC.....	18
Figura 7 - Definição dos critérios de desempenho e seu acompanhamento	18
Figura 8 - Definição de metas e seu acompanhamento	19
Figura 9 - O monitoramento feito em a(2)	19
Figura 10 - Reavaliação do Programa de Manutenção	20
Figura 11 - Conjunto de Equipamento Exemplo.....	21
Figura 12 - Gráfico da disponibilidade, critério de desempenho e meta	21
Figura 13 - Diagrama de Blocos Funcionais do GDE	23
Figura 14 - Dependência da disponibilidade do gerador diesel em relação ao intervalo de testes, segundo o modelo da expressão (3.6a).....	37
Figura 15 - Período de Testes A-1 com frequência quinzenal.....	45
Figura 16 - Taxa de falha ao longo do período A-1	46
Figura 17 - Probabilidade de falha ao longo do período A-1	46
Figura 18 - Exemplo de comportamento de falha observado em diversos períodos de análise	47
Figura 19 - Diagrama que ilustra dados de falha agrupados	48
Figura 20 - Dados de falha não-agrupados.....	48
Figura 21-Taxa de falha cumulativa H(t) (FRUTUOSO E MELO, 2013).....	49
Figura 22 - Taxa de falha cumulativa do período A-1.....	50
Figura 23 – Gráfico de parâmetros da distribuição de Weibull para período A-1.....	51
Figura 24 - Período de Testes A-2 com frequência mensal.....	64
Figura 25 - Taxa de falha ao longo do período A-2	64

Figura 26 - Probabilidade de falha ao longo do período A-2	65
Figura 27 - Período de Testes A-3 com frequência semanal.....	65
Figura 28 - Taxa de falha ao longo do período A-3	66
Figura 29 - Probabilidade de falha ao longo do período A-3	66
Figura 30 - Período de Testes B-1 com frequência quinzenal.....	67
Figura 31 - Taxa de falha ao longo do período B-1	67
Figura 32 - Probabilidade de falha ao longo do período B-1	68
Figura 33 - Período de Testes B-2 com frequência mensal.....	68
Figura 34 - Taxa de falha ao longo do período B-2	69
Figura 35 - Probabilidade de falha ao longo do período B-2	69
Figura 36 - Período de Testes C-1 com frequência quinzenal.....	70
Figura 37 - Taxa de falha ao longo do período C-1	70
Figura 38 - Probabilidade de falha ao longo do período C-1	71
Figura 39 - Período de Testes C-2 com frequência semanal	71
Figura 40 - Taxa de falha ao longo do período C-2.....	72
Figura 41 - Probabilidade de falha ao longo do período C-2	72
Figura 42 - Período de Testes D-1 com frequência quinzenal.....	73
Figura 43 - Taxa de falha ao longo do período D-1	73
Figura 44 - Probabilidade de falha ao longo do período D-1	74
Figura 45 - Período de Testes E-1 com frequência quinzenal.....	74
Figura 46 - Taxa de falha ao longo do período E-1	75
Figura 47 - Probabilidade de falha ao longo do período E-1	75
Figura 48 - Período de Testes E-2 com frequência quinzenal.....	76
Figura 49 - Taxa de falha ao longo do período E-2	76
Figura 50 - Probabilidade de falha ao longo do período E-2	77
Figura 51 - Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período A-2.....	78
Figura 52-Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período B-1.....	79
Figura 53-Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período B-2.....	80
Figura 54-Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período C-1	81

Figura 55-Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período C-2	82
Figura 56-Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período D-1	83
Figura 57-Taxa de Falha cumulativa $H(t)$ do período E-1.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos registros	40
Tabela 2- Períodos de análise e taxas de falha obtidas	42
Tabela 3 - Resumo do comportamento das curvas de taxa de falha por período.....	47
Tabela 4 - Resumo da tendência das curvas de taxa de falha x parâmetros de forma Weibull.....	52
Tabela 5 - Médias das taxas de falha e probabilidade de falha dos MD.....	54
Tabela 6 - Comparativo por frequência de teste	54
Tabela 7 - Taxas de falha para motores diesel com aplicação de geração de emergência. Fonte: OREDA, 2015.....	55
Tabela 8-Comparação dos resultados com o OREDA	55
Tabela 9- Indisponibilidades médias dos MD	56
Tabela 10 - Configuração de Geradores instalados e sua classificação por grupos....	62
Tabela 11 - Configuração em P1, P2 e P3.....	63
Tabela 12 - Metas de confiabilidade para Geradores Diesel de Emergência	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APS	Análise Probabilística de Segurança
CDF	Frequência de dano ao núcleo (<i>Core Damage Frequency</i>)
CFR	<i>Code of Federal Regulations</i>
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSN	<i>Consejo de Seguridad Nuclear</i>
EPRI	<i>Electrical Power Research Institute</i>
ESC	Estrutura, Sistema e Componente
FBD	<i>Functional Block Diagram</i>
GDE	Gerador Diesel de Emergência
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
INPO	<i>Institute of Nuclear Power Operations</i>
MD	Motor Diesel
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
NUMARC	<i>Nuclear Management and Resource Council</i>
OREDA	<i>Offshore and Onshore Reliability Data</i>
RM	Regra da Manutenção
SENUF	<i>Safety of Eastern European type Nuclear Facilities</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$A(t)$	Disponibilidade
$A^*(\infty)$	Disponibilidade média assintótica
$F(t)$	Função de distribuição cumulativa
m	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
$R(t)$	Confiabilidade
$n(T)$	Número de falhas registradas no período T
$N(T)$	Número de demandas registradas no período T
T_0	Intervalo entre testes
θ	Parâmetro de escala da distribuição de Weibull
λ	Taxa de falha
$H(t)$	Taxa de falha cumulativa
μ	Taxa de reparo

1. Introdução

A experiência de operação e os resultados das análises de segurança determinísticas e probabilísticas mostram a importância crucial dos sistemas de alimentação elétrica de emergência para a segurança das usinas nucleares. É universalmente reconhecida a necessidade de uma alta disponibilidade destes sistemas, em particular dos geradores diesel de emergência. Caso a rede elétrica externa esteja indisponível ou parcialmente disponível, eles deverão fornecer com alta confiabilidade a energia elétrica que demandam as bombas e outros consumidores de vários níveis de potência dos diversos sistemas de segurança da usina; sistemas que devem enfrentar com sucesso os eventos iniciadores de acidente previstos nas bases de projeto.

Uma baixa disponibilidade dos geradores diesel de emergência implica na redução da confiabilidade dos sistemas de resfriamento de emergência do núcleo e de outros sistemas importantes para a segurança, o que conduz a um incremento do risco de dano ao núcleo do reator (SAMANTA et al., 1994). Um caso extremo, motivo de grande preocupação é a possibilidade da condição chamada *station blackout* que se configura na falha total dos geradores diesel de emergência quando a rede elétrica exterior também não está disponível.

A Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos (NRC) define o *station blackout* como a perda completa da fonte de corrente alternada externa ao mesmo tempo em que há o desligamento da geração pelas turbinas e falha dos sistemas de geração reserva e, por fim a última salvaguarda que são os geradores diesel de emergência (NRC, 1988). Nesse caso o resfriamento do núcleo dependerá fundamentalmente do retorno, em tempo razoável, de alguma fonte de energia elétrica interna ou externa. Trata-se, portanto, de um cenário crítico que impõe um importante desafio à segurança da usina (Figura 1).

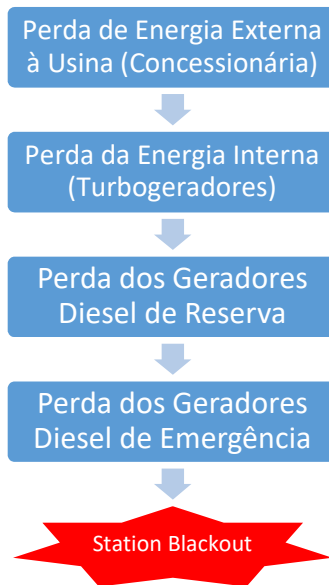


Figura 1 - Sequência de eventos que configura o Station blackout

Um levantamento feito nas usinas americanas mostrou que quando geradores diesel estão indisponíveis por falha ou intervenções de manutenção, a frequência de dano ao núcleo (CDF) cresce cerca de 3 a 12 vezes em relação à CDF do caso base determinada nas APS (SAMANTA et al., 1994). Pode-se observar com detalhes na Figura 2, para cada uma das usinas representadas pelas siglas SR1, SQ1, GG, PB2, BR1 e BR2, que houve um acréscimo da CDF para DG1, DG2 ou DG3 quando respectivamente o trem 1, 2 ou 3 está indisponível.

Além disso, constatou-se que diversas usinas já tinham tido a experiência de perder a energia externa da concessionária. Em quase todas as ocorrências, o sistema de geração elétrica de emergência entrou rapidamente, gerando a energia necessária para o funcionamento dos sistemas essenciais. Entretanto, relatou-se, em alguns casos, a falha em um dos geradores redundantes, na partida ou durante a operação subsequente, sendo que em determinados incidentes houve a perda total da energia elétrica de corrente alternada, ou seja, ocorreu o *station blackout*, porém, a energia foi retomada posteriormente sem consequências.

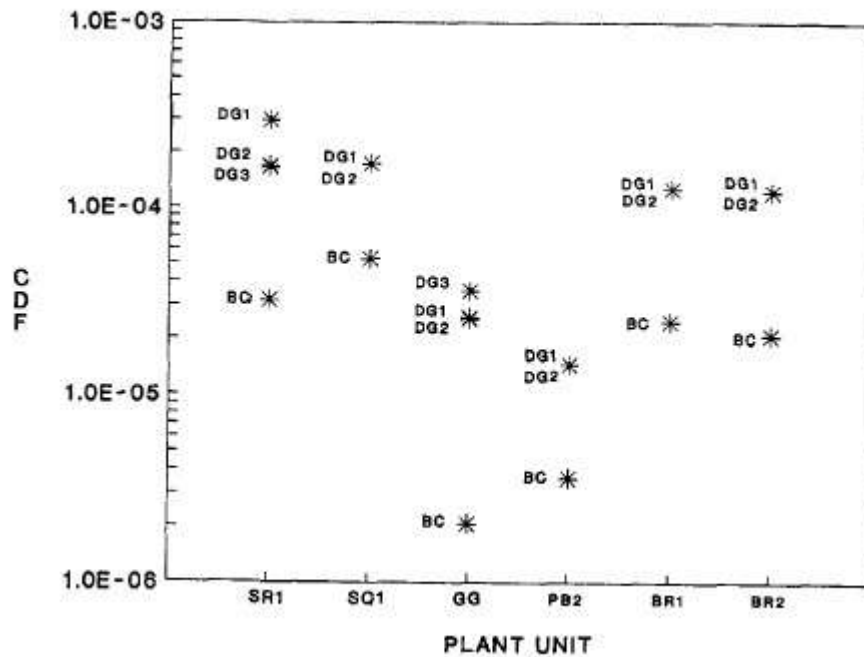


Figura 2 - Impacto no CDF quando o gerador diesel está indisponível (SAMANTA et al., 1994)

Diante desse cenário, a NRC regulamentou uma série de exigências para a prevenção ou mitigação desse cenário de acordo com o documento RG 1.155 de 1998, levando-se em consideração 3 áreas:

- Manutenção dos sistemas de alimentação elétrica em nível altamente confiável;
- Procedimentos e treinamento para restabelecer a energia da usina
- Garantia de que as usinas suportem o estado de *station blackout* por um determinado período de tempo

É nesse contexto que se ressalta a importância de se aprimorar estratégias de manutenção a fim de aumentar a confiabilidade de geradores diesel de emergência.

Durante muito tempo, as políticas de manutenção foram decididas livremente pelos operadores sem a intervenção da NRC, mas, posteriormente, a experiência demonstrou que para garantir os altos níveis de disponibilidade exigidos aos sistemas importantes para a segurança, era necessário estabelecer

regulações sobre manutenção de cumprimento obrigatório por parte dos operadores. Foi assim que surgiu nos Estados Unidos a regulação NRC 10 CFR 50.65 chamada de Regra da Manutenção (RM). A regra, entre outros aspectos, estabelece uma classificação dos componentes e determina o cumprimento de metas de confiabilidade para aqueles mais críticos, classificados como a1.

No caso específico dos geradores diesel de emergência, as estatísticas sobre falhas mostram o papel transcendental dos testes periódicos no descobrimento destas e, conseqüentemente, para o cumprimento da meta de confiabilidade estabelecida em atenção às exigências da RM. Na prática, a imensa maioria das falhas dos geradores diesel, que possibilitaram sua manutenção corretiva a tempo, tem sido identificada nos testes periódicos.

Neste contexto, o presente trabalho está orientado à avaliação dos fatores envolvidos na realização dos testes periódicos dos geradores diesel de emergência, especificamente a frequência de testes que está fortemente determinada pela meta de disponibilidade estabelecida em atenção à RM. Os intervalos de teste dos componentes importantes para a segurança que permanecem em espera formam parte das condições e limites operacionais da usina, sob controle do órgão regulador.

De fato, resulta importante não deixar passar um tempo excessivo sem realizar testes porque isso contribuiria para uma progressão inadmissível das falhas não reveladas, mas, por outro lado, a realização de testes muito frequentes poderia contribuir para a degradação do equipamento, o que também é motivo de preocupação (KIM et al., 1993). Na indústria nuclear, os intervalos entre testes são bem definidos nas Especificações Técnicas do Relatório Final de Análise de Segurança, porém seria possível por meio deste estudo, argumentos para a sua extensão. Estas considerações fundamentam a importância do problema ao que se orienta o presente trabalho com o seguinte objetivo:

“Avaliar, mediante a análise estatística dos registros de falhas, os fatores associados aos testes periódicos do gerador diesel de emergência e o impacto da frequência de testes na disponibilidade, visando o cumprimento da meta estabelecida pela Regra da Manutenção.”

1.1. Estrutura do trabalho

De forma a alcançar os objetivos expostos, o trabalho está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 2, de forma geral, efetua a revisão bibliográfica sobre os tipos de manutenção existentes e definições utilizadas na indústria. Em seguida, são abordados conceitos importantes para este trabalho como parâmetros de confiabilidade e as fases de taxa de falha caracterizando a curva da banheira. A sistemática da Regra da Manutenção é discutida como um dos objetivos de se fazer esta análise para a tomada de decisão de acordo com seu critério de desempenho que, no caso dos GDE, é a disponibilidade.

O Capítulo 3 propõe uma metodologia de cálculo da disponibilidade dos GDE considerando fatores como degradação cumulativa decorrente das partidas sucessivas. Essa proposta tem o objetivo de ser utilizada para a avaliação do atendimento ou não das metas impostas pela RM.

O Capítulo 4 apresenta o critério de escolha dos geradores diesel utilizados neste trabalho. O período selecionado para cada um deles e a fórmula de cálculo da taxa de falha, probabilidade de falha acumulada (indisponibilidade) e seu parâmetro de forma da distribuição de Weibull exibindo de forma gráfica seus resultados. Os geradores diesel escolhidos não são de instalações nucleares, entretanto, seus resultados podem ser revertidos para a experiência operacional da indústria nuclear.

O Capítulo 5 resume todos os resultados e compara o desempenho dos GDE com frequências semanal, quinzenal e mensal para validar a hipótese de degradação devido aos testes. Além disso, são comparados os valores obtidos de taxa de falha dos motores diesel da literatura (OREDA, 2015).

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões e críticas baseadas nos resultados obtidos e aponta possíveis rumos e desenvolvimentos futuros deste trabalho.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Tipos de manutenção

A manutenção, segundo a NBR-5462 é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. A manutenção também pode incluir uma modificação de um item.

Os recursos, sejam humanos ou materiais, sobressalentes e ferramentas, utilizados na manutenção são limitados e, por isso, é preciso então priorizar, planejar e programar as suas atividades de forma adequada.

Existem, basicamente, 3 tipos de manutenção, sendo que suas definições variam bastante. Abaixo estão descritas as foram utilizadas neste trabalho e suas características:

2.1.1. Manutenção corretiva

Atividade que corresponde às ações de reparo ou troca de um ESC (Equipamento, sistema ou componente) em falha a fim de restaurar sua função segundo um critério de aceitação (IAEA, 2007). Ocorre após a falha e a intervenção no equipamento costuma ser não planejada, acarretando em maior tempo de execução. Além disso, seus custos são maiores, pois o nível de dano ao equipamento como um todo geralmente é maior.

2.1.2. Manutenção preventiva

Atividade que corresponde às ações para detectar ou mitigar a degradação funcional de um ESC para sustentar ou estender seu tempo de vida útil de forma a controlar essa degradação a um nível aceitável (IAEA, 2007). A manutenção é feita através de substituição de componentes, monitorando-os ou

efetuando-se testes funcionais. Ocorre de forma periódica em tempo calendário ou operacional do equipamento (ciclos, horas etc.), por isso, é recomendado para ESC que possuem vida útil pré-determinada (Ex.: Filtros de óleo, rolamentos, correias etc.) (MOUBRAY, 1997).

2.1.3. Manutenção preditiva

Esta atividade pode ser classificada também como uma manutenção preventiva, pois é feita antes da falha e atua de forma proativa. Pode ser feita de forma contínua (a partir da leitura *on-line* por sensores embarcados, ou aquisição periódica a partir de instrumentos). Com os seus resultados, é possível detectar e traçar tendências de que o equipamento apresentará falha. Pode utilizar técnicas como aquisição de testes de vibração, de termografia, de medição acústica, entre outras. É recomendada principalmente para componentes que não possuam uma vida útil pré-definida, porém, apresentam “indícios” de que irão falhar. (Ex.: Detecção de aquecimento em conexões, vibração de mancais, perda de estanqueidade em válvulas etc.) (MOUBRAY, 1997).

2.2. Parâmetros de confiabilidade

Neste trabalho, serão utilizados alguns parâmetros de confiabilidade tais como a própria definição de confiabilidade, taxa de falha e disponibilidade. Outros parâmetros serão introduzidos futuramente, durante a análise dos dados de falha.

2.2.1. Confiabilidade

A confiabilidade de um ESC é definida como a probabilidade de que o mesmo funcione por um período de tempo e condições operacionais especificados (FRUTUOSO E MELO, 2013).

De forma quantitativa, a confiabilidade é dada pela expressão:

$$R(t) = P(T > t) \quad (2.1)$$

Sendo T a variável aleatória que caracteriza a vida de um ESC.

2.2.2. Taxa de falha

Considerando $P(t)$ a probabilidade de falha em um dado tempo t , $f(t)$ como função densidade de probabilidade, $F(t)$ a função acumulada de probabilidade e $R(t)$ a confiabilidade de um item (FRUTUOSO E MELO, 2010), tem-se:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) \quad t > 0 \quad (2.2)$$

Impondo a condição da ESC estar operacional no tempo t e analisando em $\Delta t > 0$, tem-se:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (2.3)$$

Dividindo-se a equação (2.3) por Δt e levando ao limite de 0, obtém-se a taxa de falha:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \cdot \Delta t} = -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.4)$$

Neste trabalho, por simplificação, a taxa de falha calculada é constante, e determinada estatisticamente mediante a expressão:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\text{N}^\circ \text{ de falhas}}{\text{Unidade de tempo}} \quad (2.5)$$

2.2.3. Disponibilidade

Para sistemas em reserva, como no caso dos GDE, um atributo de confiabilidade importante é o da disponibilidade, definida como a probabilidade do mesmo estar funcionando em um instante de tempo especificado (FRUTUOSO E MELO, 2013). De maneira prática, pode ser definida como a fração do tempo que ESC está no estado operacional.

A disponibilidade média $A^*(\infty)$ pode ser determinada como função da disponibilidade instantânea $A(t)$ num período T mediante a expressão:

$$A^*(\infty) = \bar{A}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.6)$$

em que o tempo T pode ser o tempo de vida-útil ESC ou o tempo para cumprir uma dada missão.

Se o ESC for não-reparável, a disponibilidade será igual à confiabilidade pois a probabilidade de estar operacional em um determinado tempo t é igual à probabilidade de não falhar entre 0 e t (FRUTUOSO E MELO, 2010; LEWIS, 1994):

$$A(t) = R(t) \quad (2.7)$$

As expressões abaixo foram obtidas de FRUTUOSO e MELO (2013).

Considerando-se componente no período de vida-útil (taxa de falha constante):

$$A(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

A disponibilidade média do componente:

$$\tilde{A}(T) = \frac{1}{\lambda T} (1 - e^{-\lambda T}) \quad (2.9)$$

Quando $\lambda t < 0,1$, pode-se usar a aproximação:

$$\tilde{A}(T) \cong 1 - \frac{1}{2} \lambda T \quad (2.10)$$

De 2.10, a indisponibilidade média é dada por:

$$\tilde{\tilde{A}}(T) = 1 - \tilde{A}(T) = \frac{1}{2} \lambda T \quad (2.11)$$

2.3. Períodos característicos de vida de um componente ou sistema

Neste trabalho serão utilizadas as definições abaixo para um componente que apresenta 3 períodos de vida característicos. Esses períodos representam, em linhas gerais, o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo e são descritos graficamente pela curva da banheira. Cabe ressaltar que nem todos os tipos de componentes ou sistemas apresentam sempre todas as fases, entretanto, equipamentos mecânicos como os deste trabalho (motor diesel) normalmente apresentam os 3 períodos de vida característicos (LAFRAIA, 2011).

a) Mortalidade infantil

A taxa de falha é decrescente ao longo do tempo. É caracterizada por falhas prematuras originadas por processos de fabricação deficientes, mão-de-obra desqualificada, instalação imprópria etc (LAFRAIA, 2001; FRUTUOSO E MELO, 2010).

b) Período de vida útil

A taxa de falha é constante ao longo do tempo. É caracterizada por falhas de caráter aleatório originadas por fatores como cargas de funcionamento aleatórias maiores que o esperado, erros humanos (operacionais), fenômenos naturais imprevisíveis etc (LAFRAIA, 2001; FRUTUOSO E MELO, 2010).

c) Desgaste

Nesta fase, a taxa de falha é crescente ao longo do tempo. O equipamento inicia seu fim de vida útil, pois fatores característicos de envelhecimento, como desgaste/abrasão, fadiga, corrosão e manutenção insuficiente passam a ser predominantes (LAFRAIA, 2001;FRUTUOSO E MELO, 2010).

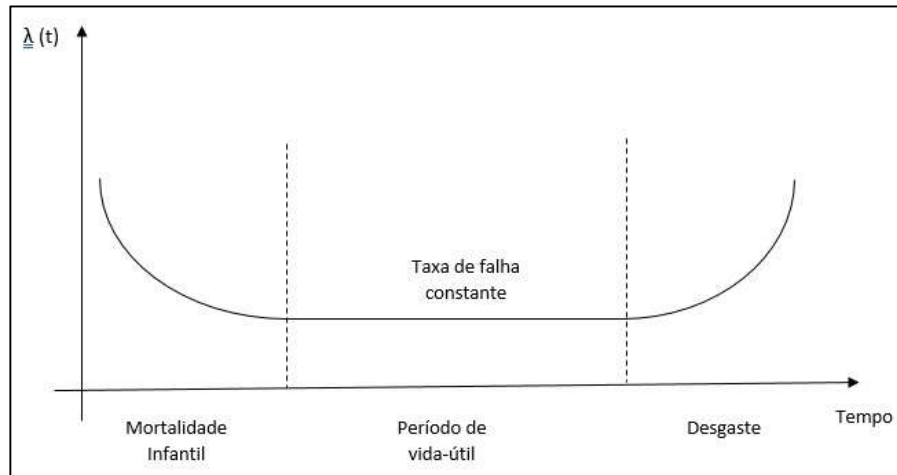


Figura 3 - Curva da banheira (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009)

2.3.1. Distribuição de Weibull

Dentre as diversas distribuições de probabilidade, destaca-se a Weibull, pois modela todas as fases da Figura 3, ou seja, sua taxa de falha pode ser decrescente, constante ou crescente representando a mortalidade infantil, vida-útil e desgaste respectivamente (FRUTUOSO e MELO, 2013). Sua taxa de falha é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{m-1} \quad (2.12)$$

em que m e θ são denominados de parâmetro de forma e de escala, respectivamente.

O comportamento da distribuição de Weibull é variado, sendo que para $m < 1$ representa a fase de mortalidade infantil, para $m = 1$, vida útil e finalmente para $m > 1$, desgaste.

2.4. A Regra da Manutenção

A regra da manutenção surgiu da necessidade da indústria nuclear dos EUA, a qual, desde 1982, sinalizava a importância em aprimorar a manutenção

devido ao seu papel em melhorar o desempenho geral da planta (NUMARC, 2011).

Em 1988, surgiram as primeiras iniciativas de se escrever um documento que tratasse formalmente do assunto. A NRC publica um conjunto de regras propostas a fim de exigir aos operadores licenciados a implantação de programas de manutenção para reduzir a probabilidade de falhas e eventos causados pela falta de manutenção efetiva.

Por fim, em 1991 a NRC publica o documento *10 CFR 50.65 - Requirements for Monitoring Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants* com a justificativa de que a manutenção apropriada é essencial para a segurança da planta. Esse documento tem sido conhecido desde então por "Regra da Manutenção".

Consequentemente, em 1992, a indústria e centros de pesquisa nuclear como *Institute of Nuclear Power Operations* (INPO) e *Electrical Power Research Institute* (EPRI) se uniram para criar um documento guia de apoio à implantação da nova regra. Esse guia foi chamado *NUMARC 93-01*¹.

Finalmente, em julho de 1996 passa a vigorar a RM e seu cumprimento pelos operadores licenciados. O processo ocorreu após 2 anos de desenvolvimento da regra e 3 anos da implantação em fase de teste em 9 usinas nucleares.

Em 2011, a NRC publica a *Regulatory Guide 1.160* que reforça o NUMARC 93-01¹ e fornece metodologias para o cumprimento dos requisitos da 10 CFR 50.65.

Além dos EUA, onde a Regra da Manutenção se tornou obrigatória, outros países adotaram parcialmente o programa de manutenção como, por exemplo, a Espanha, Hungria e Eslovênia (SENUF, 2006) e Brasil (CNEN, 1991).

Na Espanha a implantação iniciou-se em 1999 (SENUF, 2006). O órgão regulador de segurança nuclear espanhol *Consejo de Seguridad Nuclear* (CSN)

¹ Nuclear Utility Management and Resources Council (NUMARC). Em 1994, uniu-se com U.S. Council for Energy Awareness (USCEA) e American Nuclear Energy Council (ANEC) para formar o Nuclear Energy Institute (NEI).

publicou um conjunto de requisitos para permissão de operação chamado de *Instrucciones Técnicas Complementarias* (ITC), o qual contemplava a RM. As exigências, entretanto, passaram a vigorar de fato apenas em 2002, já que a Usina Nuclear de Trillo é de projeto alemão, o que dificultou a aplicação da RM feita originalmente para projetos americanos. Em 2007 foi publicado o *CSN IS-15 Requisitos para la vigilancia de la eficacia Del mantenimiento em las centrales* (CSN, 2007) que possui quase que totalmente o formato da 10 CFR 50.65.

Na Hungria, a RM se tornou pré-requisito para a renovação da licença do operador e foi implantada na Usina Nuclear de Packs.

Na Eslovênia, iniciou-se em 2001 e foi aplicada na Usina Nuclear de Krsko. A RM foi incorporada junto com outros programas de melhoria. Foram adotadas também medidas como a nomeação de um coordenador da RM e a criação de uma comissão de especialistas de diferentes áreas para aprimorar a gestão da planta.

Outros países como Rússia, República Tcheca, Eslováquia, Bulgária e Ucrânia cogitam a futura implantação da RM e, em geral, expressam o interesse em adotar um modelo similar à RM, sendo que alguns deles já criaram centros de treinamento nos procedimentos voltados nesse sentido (SENUF, 2006).

No Brasil, além da existência de algumas publicações e trabalhos que mostram o interesse na temática, na Eletronuclear a RM está implantada conforme exigência da norma CNEN NE 1.21 (CNEN, 1991) que obriga sua adoção.

Em Ferro (2011), usaram dados de falha para obter distribuições estatísticas cujos parâmetros permitam a avaliação do cumprimento da meta de confiabilidade da Regra da Manutenção. A disponibilidade do sistema é determinada mediante uma Cadeia de Markov. Destaca-se o fato de que o estudo considerou o envelhecimento dos componentes mediante ajustes ao modelo markoviano, originalmente válido apenas para taxas de falha constantes, características da etapa de vida útil dos componentes.

Em Dionizio (2014), foi feita a modelagem dos geradores diesel de emergência (GDE) utilizando redes bayesianas. A metodologia permitiu analisar

cada subsistema e seu impacto na confiabilidade global do GDE, identificando os menos confiáveis. Para esses subsistemas, recomenda-se a inserção de tarefas de manutenção com o objetivo de restabelecer a confiabilidade e permitir a extensão da vida útil do GDE.

2.4.1. Etapas e atividades da Regra da Manutenção

No trabalho foi desenvolvido um fluxograma que mostra de maneira gráfica as etapas e principais atividades que formam parte da RM (Figura 4), adaptado de (NRC, 1991; NUMARC, 2011).

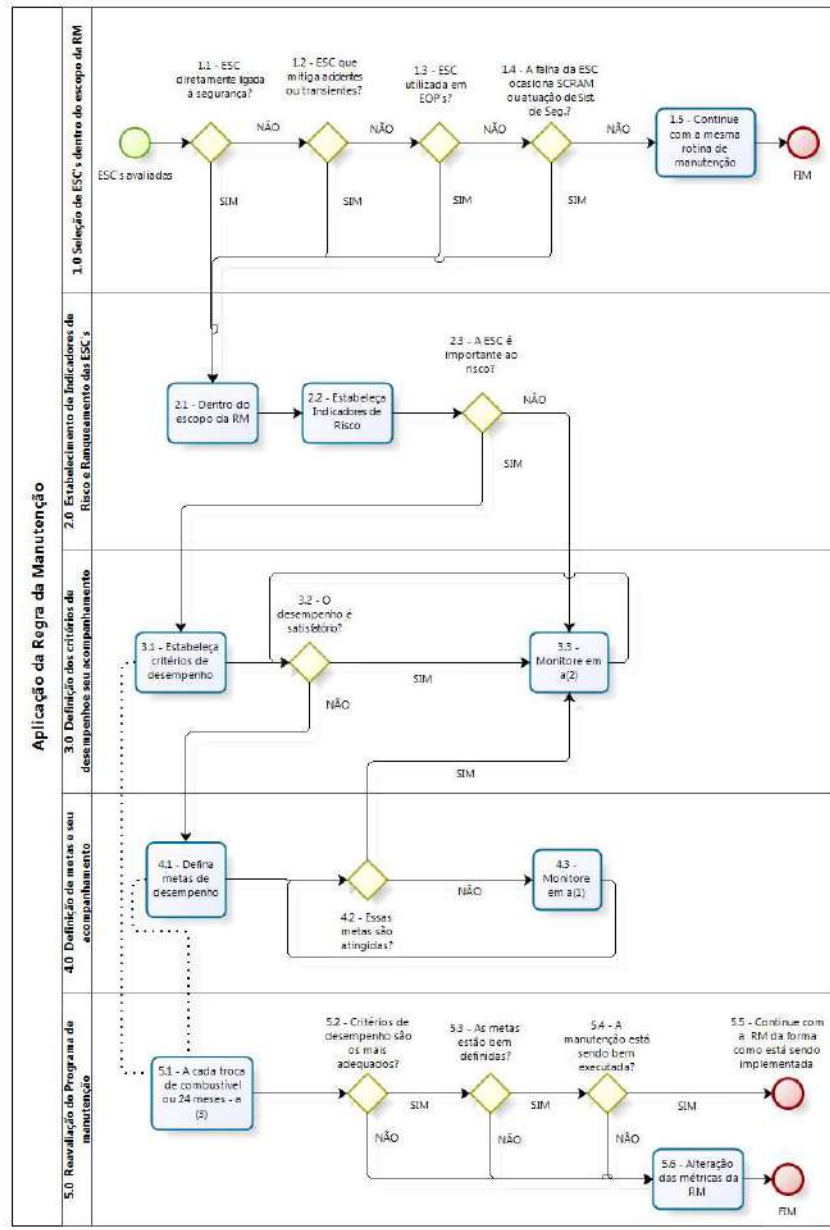


Figura 4 - Fluxograma da Aplicação da RM (NUMARC, 2011, adaptado)

A primeira etapa da regra da manutenção consiste em selecionar as Estruturas, Sistemas e Componentes (ESC) que estão dentro do escopo da regra.

A princípio, apenas os ESC que estão diretamente relacionadas à segurança entram no escopo (Ponto de decisão 1.1 da Figura 5) e isso é feito levantando-se as funções desses sistemas e classificando-as em relacionadas com a segurança ou não (NUMARC, 2011). Essa etapa é importante para a classificação, pois os equipamentos ou sistemas podem possuir diversas funções além da função de segurança, porém, apenas os componentes/equipamentos cujas falhas levem à perda da função de segurança estarão dentro do escopo da regra da manutenção.

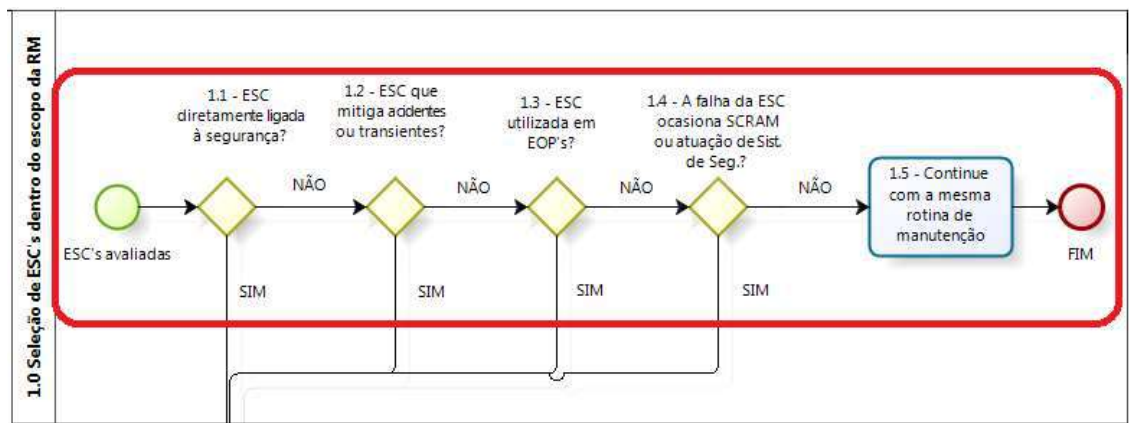


Figura 5 - Seleção de ESC's dentro do escopo da RM

Após a identificação de ESC diretamente ligadas à segurança, restam as ESC que não são diretamente ligadas à segurança. Destas, estarão dentro do escopo da RM as ESC:

- Mitigadoras de acidentes ou transientes² (Ponto de decisão 1.2 da Figura 5)

Exemplo: Sistema de Combate a Incêndio

² Evento no qual os parâmetros físicos que caracterizam um processo - tais como, temperatura e/ou pressão do sistema de refrigeração do reator- variam com o tempo. Transientes podem ser causados por: (1) adição ou remoção de veneno; (2) aumento ou diminuição da carga elétrica no gerador da turbina, ou (3) condições de acidente. (GLOSSÁRIO CNEN, 2012).

- Utilizadas em Procedimentos Operacionais de Emergência (Ponto de decisão 1.3 da Figura 5)

Exemplo: Sistema de comunicação de emergência

- Que possam evitar ESC diretamente ligadas à segurança de desempenharem sua função (Ponto de decisão 1.4 da Figura 5)

Exemplo: Válvulas que isolam equipamentos, como Vasos de pressão, que podem bloquear o funcionamento de Válvulas de alívio de pressão.

- cuja falha ocasiona *SCRAM*³ ou atuação de sistemas de segurança por falha espúria. (Ponto de decisão 1.4 da Figura 5)

Exemplo: Sistema de atuação das barras de controle

- As ESC não diretamente ligadas à segurança que não se enquadram em nenhuma das categorias acima estão fora do escopo da RM e nenhuma decisão adicional, além das tarefas de manutenção já estabelecidas, precisa ser tomada (Etapa 1.5 da Figura 5)

Após a definição das ESC que estão dentro do escopo da regra, apenas os componentes de maior importância para o risco terão critérios de desempenho e metas definidas (Ponto decisório 2.3 da Figura 6). Esta seleção é baseada no ordenamento dos componentes e equipamentos a partir de indicadores de risco (NUMARC, 2011) (Etapa 2.2 da Figura 6).

³ Interrupção rápida da operação do reator nuclear, usualmente pela inserção de barras de controle (NRC GLOSSARY, 2015)

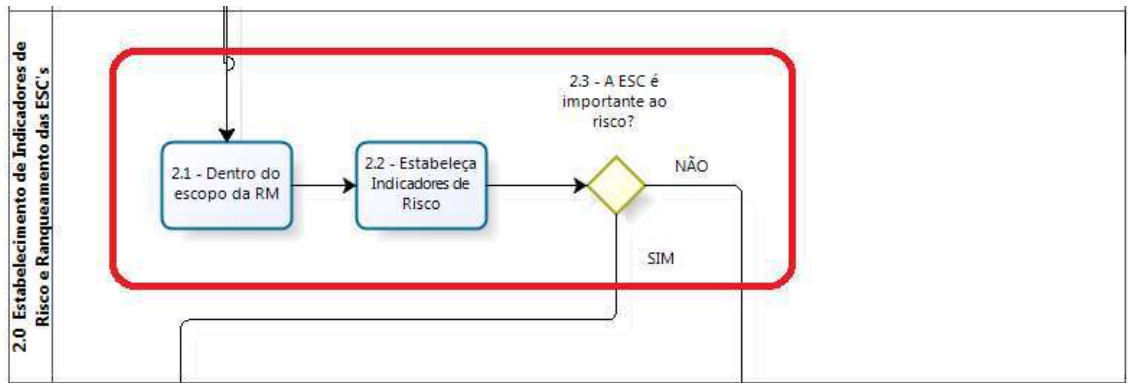


Figura 6 - Estabelecimento de Indicadores de Risco e categorização das ESC

Para as ESC identificadas como importantes ao risco devem ser atribuídos **critérios de desempenho** definidos (Etapa 3.1 da Figura 7). A título de exemplificação, poder-se-iam definir patamares mínimos de disponibilidade e de confiabilidade ou parâmetros ótimos de funcionamento particulares do equipamento em questão, ou seja, no caso de uma bomba centrífuga, definir-se-iam parâmetros como rotação, vazão, pressão de descarga enquanto no caso de um vaso de pressão, acompanhar-se-ia a pressão interna do vaso, taxa de corrosão, etc.

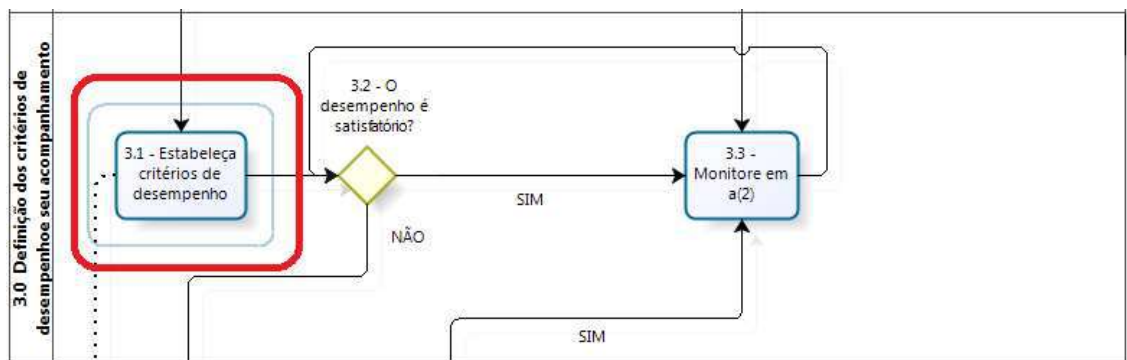


Figura 7 - Definição dos critérios de desempenho e seu acompanhamento

Caso a ESC não satisfaça o critério, este é classificado no item a(1) da RM em que deve ser estabelecida uma meta que é mais rigorosa que o próprio critério de desempenho e um monitoramento e um plano de atendimento devem ser traçados para atingir essa meta (Etapa 4.1, Ponto decisório 4.2 e Etapa 4.3

da Figura 8). A atribuição de metas passa a ser em nível de sistema, trem ou até componente, caso necessário.

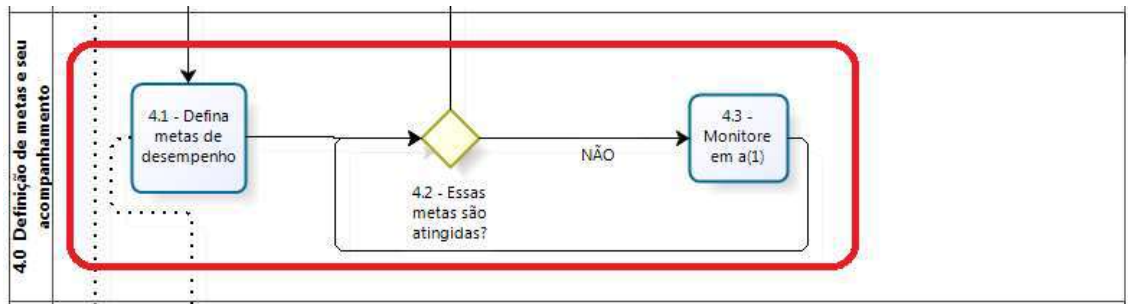


Figura 8 - Definição de metas e seu acompanhamento

Caso o desempenho seja satisfatório de acordo com o **critério de desempenho** definido, não é necessária a atribuição de metas de desempenho e a ESC é classificada no item a(2) da RM (Etapa 3.3 da Figura 9). Nesse item, é feito o monitoramento em nível de planta. A título de exemplificação, a NUMARC menciona os seguintes critérios em nível de planta:

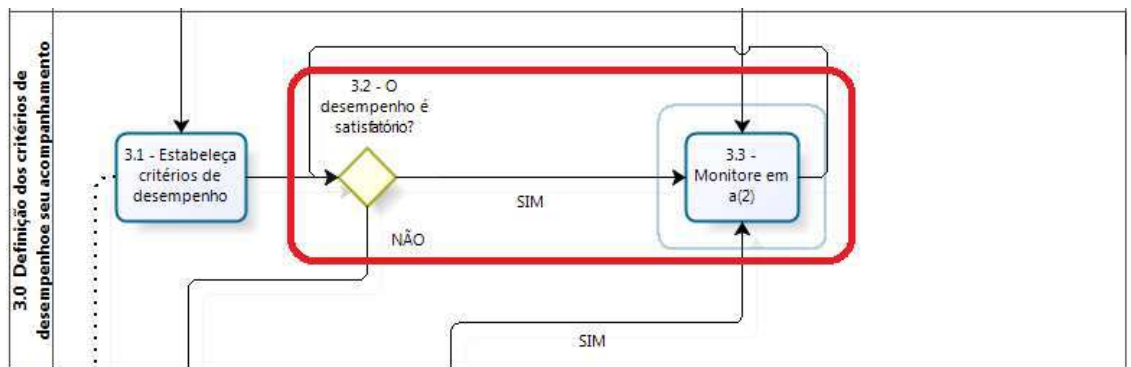


Figura 9 - O monitoramento feito em a(2)

- Número de desligamentos não planejados da planta durante 7000h com o reator em estado crítico.
- Número de atuações não planejadas de sistemas de segurança.
- Reduções não planejadas do fator de capacidade.

No item a(2) são feitas rotinas periódicas de manutenção preventiva, preditiva e teste funcional e o registro destas manutenções ou demandas reais são utilizadas para reavaliar se seu desempenho ainda é satisfatório.

Para as intervenções de manutenção dos equipamentos, deve ser feita a quantificação do incremento de risco de se ter indisponível esse equipamento e seu impacto na função de segurança que desempenha, segundo a(4) da RM. Por exemplo, ao se efetuar uma manutenção preventiva que indis põe um dos trens do sistema de alimentação elétrica de emergência, deve-se quantificar o incremento de risco correspondente à configuração em que está operando a usina nesse momento. Se adicionalmente existem outros subsistemas já indisponíveis, o incremento de risco poderia ser inaceitável e a tarefa de manutenção prevista para o trem de alimentação elétrica de emergência deverá ser postergada.

A cada ciclo de troca de combustível ou a cada 24 meses (Etapa 5.1 da Figura 10) deve ser feita uma reavaliação do programa de manutenção conforme item a(3) da RM. Essa reavaliação engloba a revisão dos critérios de desempenho, metas e efetividade da manutenção (Pontos decisórios 5.2, 5.3, e 5.4 da Figura 10) que caso estejam adequados, continuarão da forma como está sendo executada, porém, caso qualquer um desses itens avaliados esteja inadequados, as métricas do programa da RM serão alteradas num processo de melhoria contínua (Etapa 5.6 da Figura 10).

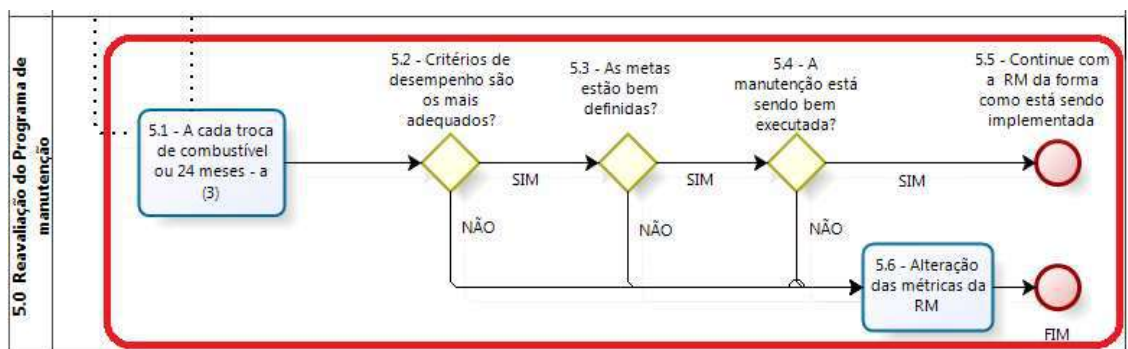


Figura 10 - Reavaliação do Programa de Manutenção

O estabelecimento de critérios de desempenho e metas como parte dos processos da RM, pode ser explicado com base no seguinte exemplo de um

sistema de segurança com grau de redundância 2 x 100%, composto pelos trens A e B (Figura 11). Neste caso, o **critério de desempenho** definido é de **95 % de disponibilidade** medida para cada trem, dada a importância de sua função. O acompanhamento em nível de sistema poderia ocultar o desempenho insuficiente de um dos trens se o outro tivesse um desempenho excepcionalmente bom. O critério de desempenho não é arbitrariamente adotado, mas sim baseado em estudos de risco como a APS. Ele representa a disponibilidade do trem que corresponde ao risco base da usina.

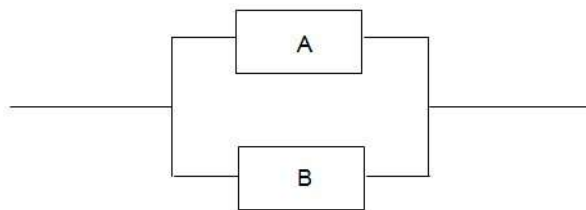


Figura 11 - Conjunto de Equipamento Exemplo

Acontece que, na reavaliação do programa de manutenção, os valores de disponibilidade medidos para cada um dos trens são os mostrados na Figura 12.

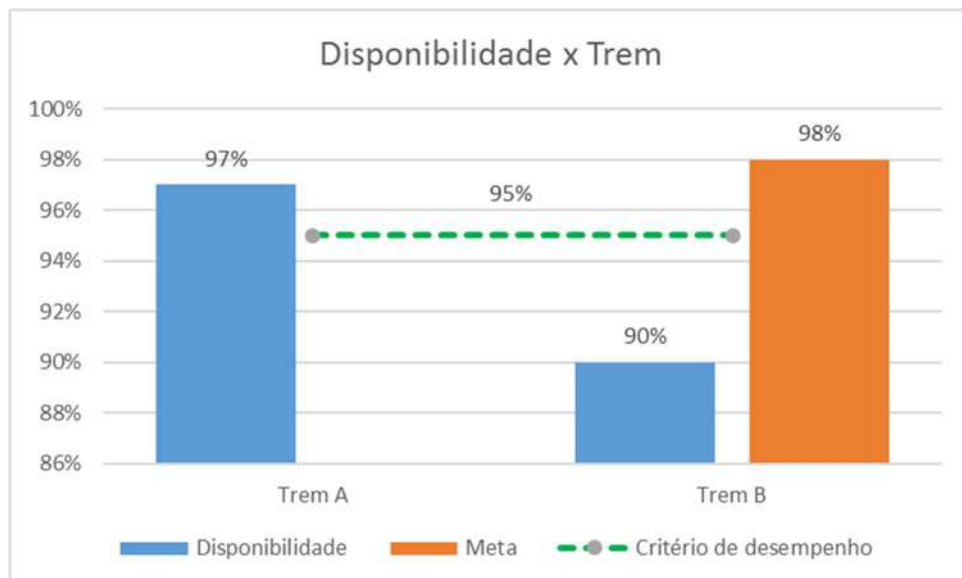


Figura 12 - Gráfico da disponibilidade, critério de desempenho e meta

Então, o desempenho do trem A está acima do **critério de desempenho** definido, pois sua disponibilidade é de 97%. Já o do trem B está abaixo com 90% e por isso, o sistema deve ser classificado como a1, com uma **meta de desempenho** de 98% a ser perseguida a fim de que o trem A mantenha seu desempenho e o trem B retorne às condições satisfatórias previstas nos estudos de risco.

2.5. O Gerador Diesel de Emergência (GDE)

O Sistema de Geração Diesel de Emergência é composto basicamente pelo Motor Diesel, seus subsistemas auxiliares e o Gerador Elétrico, sendo que o primeiro fornece rotação mecânica para o segundo gerar a energia elétrica. A relação funcional entre os sistemas que compõem o sistema GDE pode ser descrita pelo diagrama FBD construído neste trabalho (Figura 13).

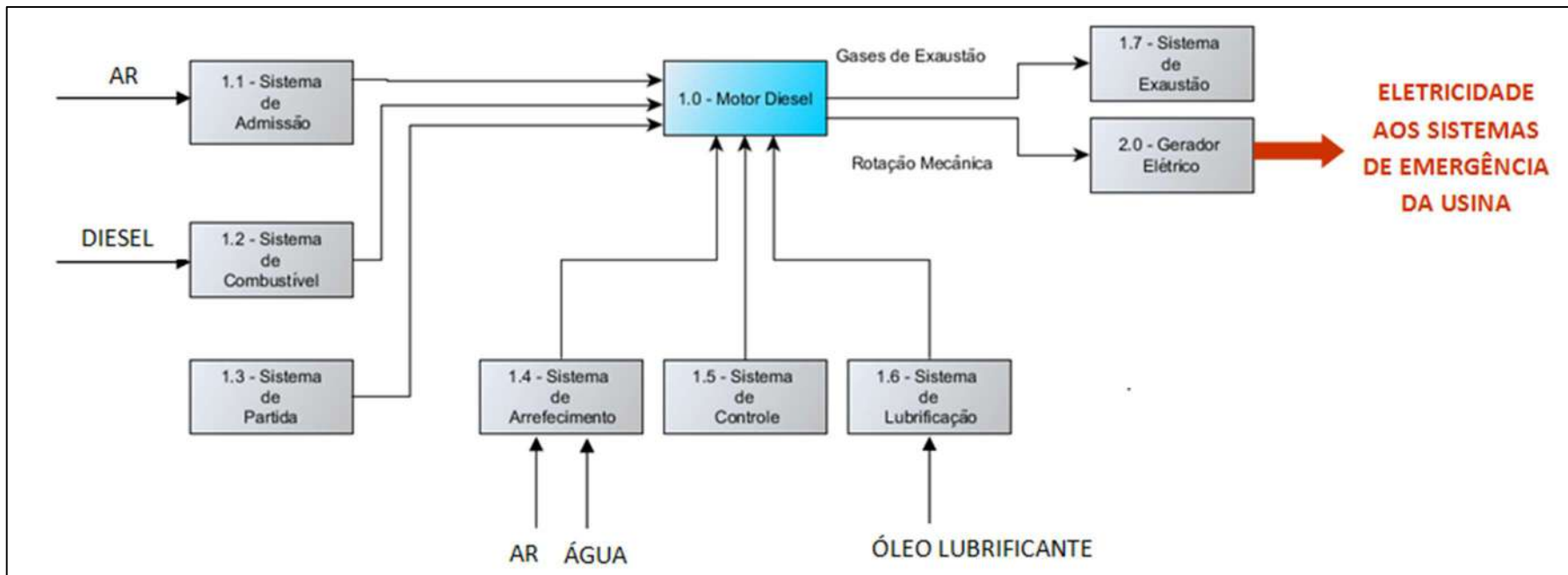


Figura 13 - Diagrama de Blocos Funcionais do GDE

2.5.1. Funcionamento do Motor Diesel

O motor diesel (Bloco 1.0 da Figura 13) é um motor a combustão interna cujos principais componentes são:

- Eixo de comando de válvulas: Responsável pela abertura e fechamento das válvulas. Quando o eixo gira, seus came pressionam a extremidade da haste da válvula permitindo seu deslocamento e consequentemente a entrada de ar e combustível e saída de gases de exaustão.
- Correia, pinhão e coroa: A correia transmite o giro entre virabrequim ao eixo de comando através do pinhão do virabrequim à coroa do eixo de comando.
- Cilindro: O cilindro, apesar de elemento estático no conjunto, possui sua importância, já que suas paredes possuem ranhuras, as quais retêm óleo do cárter para lubrificação e passagem do pistão.
- Conjunto de válvulas de entrada e admissão e tuchos: As válvulas de entrada e admissão possibilitam a entrada dos gases e combustível e saída dos gases de exaustão. Os tuchos das válvulas têm a finalidade de retenção e estanqueidade da câmara de combustão e geralmente são feitos de polímero.
- Pistões, anéis e biela: Através da combustão dos gases, os pistões são pressionados e transferem o movimento através da biela. Um pino é conectado entre a cabeça do pistão e a biela. Os anéis da biela promovem a estanqueidade para que os gases de exaustão não escapem para o cárter, diminuindo assim a potência do motor. A parte submetida a maior desgaste deste conjunto é a saia do pistão, pois ao haver o deslocamento ao longo de seu curso, é esta parte do componente que é submetida ao maior atrito na parede do cilindro.
- Eixo de virabrequim (manivela): Conectam-se com as bielas através de mancais hidrodinâmicos. Ao longo do interior de seu eixo há um conjunto de galerias, as quais passa óleo para auxiliar na lubrificação.

- Bloco e cabeçote: São os elementos estruturais do motor. Possuem galerias as quais fluem líquido arrefecedor. A junta entre o bloco e o cabeçote garante a estanqueidade do conjunto. O cárter possui a função de reserva do óleo lubrificante que circula internamente no motor.

A seguir, a descrição dos sistemas auxiliares ao motor diesel e seus principais componentes:

- Sistema de admissão (Bloco 1.1 da Figura 13): Responsável por fornecer ar comprimido ao motor diesel. O ar é coletado da atmosfera, passa pelos filtros de ar e é comprimido pelo turbocompressor, passando pelo coletor de admissão.

- Sistema de combustível (Bloco 1.2 da Figura 13): Responsável por fornecimento e armazenamento de combustível ao motor diesel. Seus principais componentes são: o tanque de diesel, filtros de combustível, bomba de combustível e bicos injetores.

- Sistema de partida (Bloco 1.3 da Figura 13): Responsável por estabelecer o giro de partida e retirar o motor de sua condição de inércia. Seus principais componentes são o conjunto de baterias, o qual fornece energia ao motor de partida (ou de arranque) para transferir rotação ao conjunto pinhão/cremalheira do motor.

- Sistema de arrefecimento (Bloco 1.4 da Figura 13): Responsável pelo arrefecimento do conjunto do motor. Os principais componentes são: o ventilador, o qual promove a circulação forçada de ar sobre radiador e a bomba de água que através das mangueiras promove a circulação de água dentro do bloco do motor.

- Sistema de controle (Bloco 1.5 da Figura 13): Responsável pelo controle da rotação do motor através da maior ou menor injeção de combustível. Seu principal componente é o governador/borboleta.

- Sistema de lubrificação (Bloco 1.6 da Figura 13): Possui a função de lubrificação entre as partes móveis dos componentes internos do motor, além disso, possui a importante função de arrefecimento junto

com o sistema de arrefecimento, já que quando o óleo ao circular sobre os componentes, efetua a remoção do calor.

- Sistema de exaustão (Bloco 1.7 da Figura 13): Responsável pela exaustão dos gases. É composto basicamente pelo coletor de exaustão.

2.5.2. Funcionamento do Gerador Elétrico

O princípio de funcionamento do gerador é regido pela indução eletromagnética. Segundo a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético produz corrente em um circuito fechado. Essa variação é proporcionada pela rotação das espiras sobre um campo magnético estático. Assim, o gerador converte energia mecânica em elétrica. Seus principais componentes são os abaixo descritos (KATO®, 2004).

- Cubo de acoplamento: Responsável pelo acoplamento com o eixo de saída do motor diesel.
- Enrolamentos do estator: São feitos de cobre (bobinas de cobre), o núcleo do estator é soldado ou faz parte da estrutura de aço.
- Rotor: O conjunto do rotor principal é o campo rotacional. Ele consiste de enrolamentos em um núcleo, que, por sua vez, está montado sobre um eixo de aço.
- Rolamentos: São um ou dois e são isolados (não necessitam de lubrificação).
- Caixa de Ligação: abriga os terminais do condutor de carga. E ainda, o gerador pode apresentar caixas de ligação auxiliares para saídas do detector de temperatura, conectores do aquecedor de ambiente e saídas do elemento sensor.
- Induzido da excitatriz e estator da excitatriz: O conjunto do induzido do excitador é uma bobina chavetada no eixo do gerador. e o conjunto do estator do excitador consiste de enrolamentos em um núcleo.

- Retificador: O retificador rotativo é um retificador trifásico de onda completa em ponte, convertendo a corrente alternada do induzido da excitatriz para corrente contínua, que é transferida para os enrolamentos do rotor principal.

2.5.3. Testes, inspeções e calibrações nos Geradores Diesel de Emergência

O fabricante do GDE recomenda uma série de testes e inspeções em seu manual de operação e manutenção. Sendo que o mesmo recomenda que para aplicações de geração de emergência, elas sejam adotadas para garantir máxima disponibilidade, vida útil maior e um mínimo de reparos dispendiosos (CATERPILLAR, 2000). Porém, não se fornece a frequência em que esses testes devem ser feitos. Recomenda apenas que o usuário entre em contato com um revendedor para obter mais detalhes. A seguir, está a descrição sucinta dos testes a serem feitos:

a) Teste de Isolamento

O objetivo deste teste é verificar a qualidade do isolamento dos condutores elétricos do estator a partir do instrumento Megôhmetro. Funciona impondo uma forte tensão em CC para promover uma pequena corrente e, dessa forma, medir a sua resistência. Sua medição varia conforme a umidade ou a sujeira, já que estas degradam o isolamento de condutores elétricos.

b) Inspeção visual de integridade

É feita uma inspeção visual dos elementos mecânicos do conjunto gerador como no motor diesel, alternador, acoplamento, radiador, mangueiras, válvulas e conectores. O objetivo é verificar de forma visual a integridade dos componentes, seu aperto e se há algum vazamento de fluido.

c) Inspeção do painel de controle

É feita inspeção visual do painel de controle do gerador e local, teste de partida e parada manual e automática no painel do gerador e local. É feita também inspeção visual do painel de baterias e do carregador de baterias.

d) Calibração dos instrumentos

É feita a calibração dos instrumentos de leitura dos seguintes parâmetros:

- Pressostato do óleo lubrificante do motor;
- Termostato da água de arrefecimento no ponto da camisa do bloco do motor;

- Termostato da água no radiador;
- Medição da rotação do motor.

e) Teste de performance e carga

São feitos testes de carga variando-se gradualmente de 0%, 25%, 50%, 75%, 100%, 110% e retornando a 0% em relação à carga nominal. Em cada uma das cargas são medidos parâmetros como:

- Potência de saída (kW)
- Corrente em cada uma das fases (A)
- Tensão entre fases (V)
- Fator de Potência
- Frequência (Hz)
- Rotação (rpm)
- Pressão do óleo lubrificante (kPa)
- Temperatura da água de arrefecimento (°C)
- Pressão do óleo combustível (kPa)
- Temperatura ambiente (°C)

f) Medição acústica

São feitas medições acústicas em diversos pontos ao redor do conjunto do GDE com 100% de carga nominal, variando-se a distância em 1m, 5m e 10m.

2.5.4. Requisitos e critérios de desempenho de Geradores Diesel de Emergência

Devido à importância e criticidade dos GDE, uma série de requisitos foi estabelecida pela NRC com o objetivo de garantir sua função.

No documento 10 CFR 50, é requerida a redundância e independência de sistemas de potência e que possam ser submetidos a testes funcionais.

A redundância aumenta a confiabilidade do sistema uma vez que na falha hipotética de um dos geradores diesel, outro trem garantirá a disponibilidade do sistema enquanto o que estiver falho não for reparado.

A independência abrange os conceitos de separação física e eliminação de serviços compartilhados e fatores de acoplamento diversos entre os trens redundantes, de modo que a ocorrência de um evento único não ocasione a perda total da função do sistema ao mesmo tempo (Falhas de causa comum). Ex.: Em Fukushima, os GDE que garantiam o suprimento elétrico e funcionamento do resfriamento de emergência do reator estavam localizados no mesmo local e foram inundados pelo *tsunami*. Neste caso, a falta de independência física foi um dos fatores contribuintes para o acidente.

Além disso, no item 10 CFR 50 Apêndice A - GDC 17 da NRC, menciona-se que o sistema deve ser capaz de garantir que:

- 1) Os limites de projeto do combustível e a pressão do refrigerante no reator nunca sejam ultrapassados.
- 2) O núcleo seja resfriado, a integridade da contenção e outras funções de segurança sejam mantidas nos acidentes postulados⁴.

Referente ao item (1), o regulamento menciona que o sistema de geração elétrica de emergência deve ser acionado prontamente após a perda da energia externa (concessionária) e interna (turbinas geradoras) nos casos de transientes

⁴ Acidente considerado como de ocorrência admissível para fins de análise, visando ao estabelecimento das condições de segurança capazes de impedir o acidente ou minimizar suas eventuais consequências (GLOSSÁRIO CNEN, 2012).

operacionais previstos para evitar que um aumento da pressão no circuito primário possa ultrapassar os limites de projeto do mesmo.

Já o item (2) menciona que o sistema de geração elétrica de emergência deve garantir, no caso de acidentes, que o seu acionamento seja suficientemente rápido e efetivo para que o resfriamento do núcleo e as funções de segurança sejam mantidos e a integridade da barreira de contenção preservada.

Além do documento 10 CFR 50, as usinas devem seguir uma série de requisitos de testes estabelecidos na Especificação Técnica do Relatório Final de Análise de Segurança.

2.5.5. Requisitos de *Station Blackout* para Geradores Diesel de Emergência

As metas para a confiabilidade de geradores diesel de emergência consideram os seguintes fatores:

- Duração requerida para suportar o blecaute
- Categorias A, B, C ou D: Em função do número de geradores redundantes instalados (vide Apêndice B, Tabela 1).
- Características P1, P2, P3: Em função das condições ambientais e de fornecimento de energia externa (vide **Apêndice A**)

A metodologia de cálculo é baseada no histórico das últimas 20, 50 e 100 partidas, verificando se os geradores diesel atendem os seguintes critérios:

Critério 1: Últimas 20 partidas > 0,9 de confiabilidade

Critério 2: Últimas 50 partidas > 0,94 de confiabilidade

Critério 3: Últimas 100 partidas > 0,95 de confiabilidade

O Guia Regulador R.G. 1.155 da NRC (1998) prescreve que caso quaisquer dos três critérios acima sejam atendidos, os geradores das categorias A, B ou C podem definir metas de 0,95 ou 0,975 dependendo da duração de blecaute que se planeja suportar e 0,975 para a categoria D. Caso nenhum dos

três critérios acima seja atendido, a meta de confiabilidade é definida em 0,95 para os geradores das categorias A, B e C. (vide **Apêndice A** Tabela 12).

No presente trabalho será utilizado o valor 95% como meta de disponibilidade ou de no máximo 5% de indisponibilidade para avaliação do cumprimento da meta da RM voltada aos GDE.

3. Modelo de cálculo de disponibilidade para equipamentos em reserva

Os GDE são equipamentos que estão em reserva (*stand-by*) ou prontidão de segurança, sendo assim, possuem a característica de passar longos períodos sem serem requisitados. Mesmo nessas condições, falhas não reveladas podem ocorrer, mas não serão percebidas e podem ser a principal causa da indisponibilidade destes sistemas.

A fim de se prevenir esse tipo de falha, são feitos testes periódicos para a detecção e sua correção antes que o equipamento seja demandado de fato. Acredita-se que quanto maior o número de testes, maior será a disponibilidade devido à detecção e correção das falhas antes que elas impactem o funcionamento do sistema. Esse conceito é incorreto, pois outros fatores devem ser levados em consideração, como indisponibilidade devido ao teste e desgaste dos componentes devido às partidas sucessivas (LEWIS, 1994).

Considerando inicialmente que o tempo de teste (t_t) e o tempo de reparo (MTTR) são desprezíveis, assim como que as manutenções são perfeitas e restabelecem o equipamento para a condição “tão bom quanto novo”, resulta um modelo teórico onde a disponibilidade assintótica $A^*(\infty)$ de um componente na etapa de vida útil está determinada apenas pelas falhas não reveladas, mediante a expressão:

$$A^*(\infty) = \frac{1 - e^{-\lambda T_0}}{\lambda T_0} \quad (3.1)$$

onde λ é a taxa de falha (constante) e T_0 é o intervalo entre testes.

Para $\lambda T_0 \leq 0,1$, aproximação majoritariamente válida para componentes da indústria nuclear, a expressão (3.1) pode ser aproximada mediante (3.2):

$$A^*(\infty) = 1 - \frac{1}{2} \lambda T_0 \quad (3.2)$$

À medida que diminuimos o intervalo entre testes, fatores como tempo de teste e de reparo se tornam significativos (LEWIS, 1994). Assim, deve-se contabilizar seu impacto no cálculo de disponibilidade.

No caso do tempo de testes, podemos aproximar a sua contribuição para a indisponibilidade como $\frac{t_t}{T_0}$.

No caso do tempo de reparo, a contribuição para a indisponibilidade é $\frac{\lambda}{\mu}$. Sendo μ a taxa de reparo que é $\frac{1}{MTTR}$.

A Eq. (3.2) considerando esses termos fica:

$$A^*(\infty) = 1 - \frac{1}{2}\lambda T_0 - \frac{t_t}{T_0} - \frac{\lambda}{\mu} \quad (3.3)$$

Na realidade, na expressão (3.3) o termo $\frac{t_t}{T_0}$ é um contribuinte da indisponibilidade apenas quando o componente permanece indisponível durante o teste, incapaz de cumprir a função de segurança se acontecesse uma demanda real enquanto o componente está sendo testado. No caso específico dos geradores diesel de emergência, o teste não indisponibiliza o componente, pelo contrário, estando no teste ele já partiu e se encontra em condições melhores para assumir uma demanda real. Portanto, este termo não será considerado no nosso modelo.

Por outro lado, o termo $\frac{\lambda}{\mu}$ correspondente à indisponibilidade por reparo quando o componente é detectado falho no teste. Embora este seja um contribuinte para a indisponibilidade do gerador diesel a ser considerado na APS, ele não intervém no cálculo de disponibilidade orientado à avaliação do desempenho na RM. A regra de manutenção avalia a disponibilidade do componente ao ser testado ou frente a uma demanda real quando o componente se encontra em espera (não em reparo ou indisponível por manutenção).

Em consequência, a disponibilidade do gerador diesel aos efeitos da RM poderia, aparentemente, ser determinada mediante a expressão (3.2) que inclui apenas a contribuição das falhas não reveladas, mas existem outros dois fatores que precisam ser considerados.

O primeiro fator está relacionado com a existência de um forte estresse sobre o gerador diesel no momento da demanda que poderia fazê-lo falhar precisamente no momento da partida. Se a indisponibilidade gerada pelo estresse da demanda é representada como q_{dem} , a expressão (3.2) se transforma em:

$$A^*(\infty) = 1 - \frac{1}{2} \lambda T_0 - q_{dem} \quad (3.4)$$

É muito difícil determinar se o resultado, componente que estava em espera não partiu porque estava falho ou porque falhou na hora devido ao estresse provocado pela demanda. Os sistemas de coleta de dados de falhas nas usinas normalmente não distinguem estas duas situações, de modo que todas as falhas são contadas na taxa de falhas λ , que representa a componente do modelo relacionada com o intervalo de testes. Na realidade, uma fração das falhas aparece durante a demanda e sua contribuição não pode ser reduzida atuando sobre o intervalo de testes. Essa fração de falhas só poderia ser reduzida modificando as condições de partida do gerador diesel, diminuindo o estresse na partida. Portanto, se este fator não for considerado no modelo, a importância do intervalo entre testes para a disponibilidade do gerador diesel poderá estar superestimada.

Para o desenvolvimento do modelo será considerado inicialmente que 40% das falhas na partida do gerador diesel são devidas ao estresse na demanda, como foi sugerido por (VESELY et al. 1987) para geradores diesel testados mensalmente. A contribuição deste fator pode ser avaliada mediante análises de sensibilidade.

O outro fator a considerar é a degradação do diesel pelo efeito cumulativo dos testes repetitivos e as demandas reais. Neste caso, será considerada a hipótese de que a degradação poderá ser representada como um incremento relativo constante $\alpha = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ que acontece depois de cada teste, sendo que o valor incrementado da taxa de falha permanece constante durante o tempo que segue até o próximo teste.

De acordo com esta proposta, a contribuição das falhas não reveladas entre dois testes consecutivos estaria incrementada pelo fator $(1+\alpha)$. Assim antes de realizar o primeiro teste seria $\frac{1}{2}\lambda T_0$, depois do primeiro teste $\frac{1}{2}\lambda T_0(1+\alpha)$, depois do segundo teste $\frac{1}{2}\lambda T_0(1+\alpha)^2$ e assim sucessivamente.

A disponibilidade média calculada para o tempo de trabalho T até a manutenção integral do diesel (com substituição dos componentes envelhecidos) seria uma média de todos os intervalos entre testes incluídos em T, sendo que o número n total de testes realizados pode ser estimado como:

$$n = \frac{T}{T_0} \quad (3.5)$$

Considerando o fator de degradação $\alpha = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, a disponibilidade assintótica pode ser determinada mediante a expressão:

$$A^*(\infty) = 1 - \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1}{2}\lambda T_0\right) (1+\alpha)^i - q_{dem}$$

$$A^*(\infty) = 1 - \left(\frac{T_0^2}{2T}\lambda\right) \sum_{i=0}^{n-1} (1+\alpha)^i - q_{dem} \quad (3.6)$$

Considerando a expressão da soma da série geométrica finita:

$$\sum_{i=0}^s x^i = \frac{1-x^{s+1}}{1-x} \quad (3.7)$$

Para $x=1+\alpha$ e $s= n-1$:

$$\sum_{i=0}^{n-1} x^i = \frac{(1+\alpha)^n - 1}{\alpha} \quad (3.8)$$

Substituindo (3.8) em (3.6) resulta a expressão final para a disponibilidade do gerador diesel orientada à avaliação de metas de disponibilidade da RM:

$$A^*(\infty) = 1 - \left(\frac{T_0^2}{2T} \lambda \right) \frac{(1 + \alpha)^{\frac{T}{T_0}} - 1}{\alpha} - q_{dem} \quad (3.6a)$$

Para uma comprovação inicial do modelo esta expressão foi avaliada para um caso típico com os dados ilustrativos:

$T=40000$ horas

$\lambda = 6E-5 \text{ h}^{-1}$ (Considerando 60% deste valor como contribuição as falhas não reveláveis)

$q_{dem} = 8,64E-3$ (Considerando 40% da indisponibilidade correspondente a testes mensais)

$\alpha = 0,02$

A expressão (3.6) foi avaliada com estes dados para intervalos de teste entre 200 e 2200 horas. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 14:

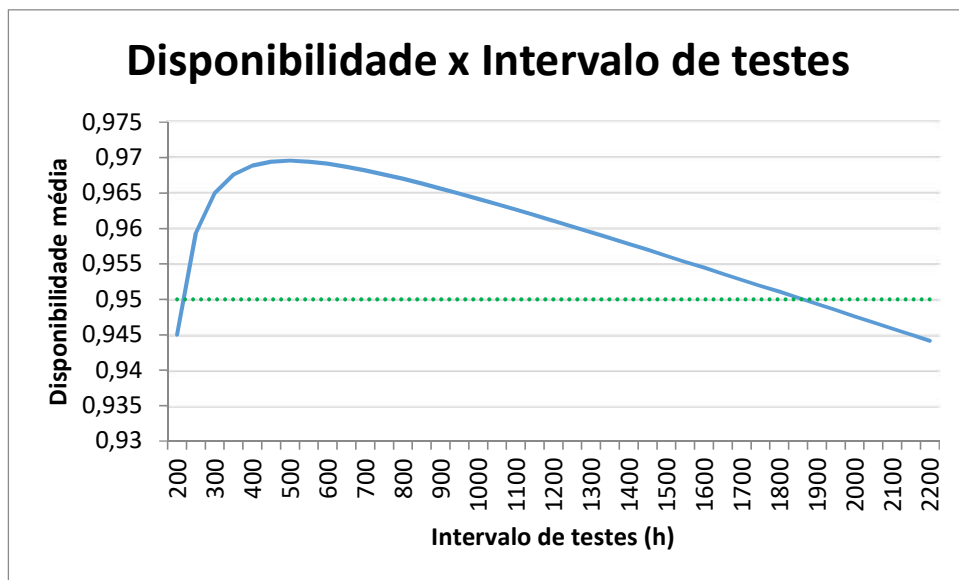


Figura 14 - Dependência da disponibilidade do gerador diesel em relação ao intervalo de testes, segundo o modelo da expressão (3.6a)

Independentemente de que a disponibilidade máxima é atingida em torno das 500 horas e que para testes mensais a disponibilidade estaria em torno de

0,97, os resultados mostram que disponibilidades acima de 0,95 ainda são atingidas com testes bimestrais (1440h), o que dá um primeiro indício sobre a possibilidade de aumentar o intervalo de teste dos geradores diesel.

4. Coleta e Análise de dados de falha de Grupos de Geradores

Os grupos de GDE escolhidos para aquisição de dados foram os que possuíam o motor diesel do fabricante Caterpillar®, modelo 3508, potência 1017 kW e rotação de 1800 rpm. A razão da escolha foi o maior número desses equipamentos instalados e pela semelhança do contexto operacional ao qual estão submetidos em um dado parque industrial de uma empresa do ramo Petrolífero. No total, foram coletados dados de 5 Grupos Geradores Diesel, denominados neste trabalho pelas letras A, B, C, D e E, por questões de sigilosidade.

A fim de verificar o impacto dos testes no desempenho dos geradores, a análise se concentrou em comparar fundamentalmente o comportamento dos geradores em testes semanais, quinzenais e mensais. Dessa forma, seria possível comprovar a hipótese sobre a existência de um incremento percentual da taxa de falha como resultado dos testes repetitivos e para estimar os valores correspondentes dos parâmetros do modelo.

4.1. Metodologia da análise dos dados

A fronteira de análise delimitou-se aos dados do Motor Diesel (MD) e seus sistemas auxiliares. Os motores diesel A, B, C e D começaram a operar em 1991, enquanto o E passou a operar em 1993. Entretanto, os registros disponíveis se iniciaram apenas a partir de 2007/2008 quando houve a implantação do *CMMS*⁵ em vigor atualmente na empresa.

Os registros foram classificados inicialmente em falhas críticas (as quais impediam o gerador de partir) e sucesso na partida, porém, no decorrer da análise, deparou-se com uma diversidade grande de tipos de registros, que para

⁵*Computerized Maintenance Management System*: Sigla que define um pacote de *softwares* integrado com a finalidade de se efetuar a gestão da manutenção, controle de inventário e controle de compra. (CATO; MOBLEY, 2001).

tornar a análise mais detalhada, deveriam ser considerados. Novas classificações foram então criadas:

Tabela 1 - Classificação dos registros

Códigos	Descrição do código	Descrição detalhada
S	Teste com sucesso	Teste realizado e o motor diesel estava operacional
NR	Teste Não Realizado	Teste não foi realizado devido a outros fatores não relacionados ao motor diesel
FC	Teste com Falha Crítica	O motor diesel não partiu
FD	Teste com Falha Degrad	Houve falha no motor diesel, porém, foi possível sua partida
I	Indeterminado	A partir dos registros, não é possível inferir nada

Para efetuar uma comparação justa entre os grupos geradores diesel, convencionou-se compará-los pelo seu período de vida-útil (taxa de falha constante), ou seja, era necessário antes de tudo determinar o período de vida-útil de cada um.

Para isso, foi definido que a vida-útil se iniciaria após 1 ano da data de comissionamento do sistema, já que esse é o tempo dado pelo fabricante Caterpillar® para garantia contra defeitos de fabricação, de acordo com sua assistência técnica autorizada Sotreq®. Além disso, cada *overhaul*⁶ da máquina significaria o início de um novo ciclo de vida-útil, já que durante sua execução basicamente as superfícies que sofrem fricção são restauradas para a sua dimensão, alinhamento e acabamento original de fábrica (DEMPSEY, 2008). O motor deveria teoricamente ser tão-bom-quanto-novo, ou inclusive melhor, já que o bloco do motor usado foi submetido a diversos ciclos de aquecimento e resfriamento que aliviam as tensões do processo de obtenção do bloco fundido (DEMPSEY, 2008). A experiência prática, entretanto aponta que o motor, por mais perfeito que seja a sua restauração, não retornará às condições de fábrica.

Por simplificação deste trabalho, o motor diesel foi considerado tão-bom quanto-novo após submetido a um *overhaul*. Foram classificados como *overhauls* os serviços que substituíssem os componentes como pistões, anéis, pinos, bielas, eixo de comando e eixo de virabrequim.

Com relação ao período de desgaste, a literatura aponta para uma elevada vida média de 1.149.071,6 km rodados para um motor diesel de um

⁶ Revisão geral normalmente efetuada em uma oficina com o objetivo de reestabelecer o equipamento a condições operacionais iniciais de uso.

caminhão pesado, além disso esses motores possuem uma durabilidade muito maior devido a projetos tradicionalmente conservadores (DEMPSEY, 2008). Neste trabalho, considerou-se de forma qualitativa que o *overhaul* nos períodos analisados ocorreu antes de atingir o período de desgaste devido à alta durabilidade e também devido ao baixo fator de carga⁷ inerente ao regime de operação desses motores. A título de exemplificação, a fabricante Caterpillar® classifica os motores diesel de emergência como fator de carga C numa escala que vai de A a E, sendo A o pior caso em que a operação é contínua e submetida a carga máxima (DEMPSEY, 2008).

4.2 Períodos de análise identificados

Seguindo a metodologia descrita, os seguintes períodos de análise foram identificados para cada um dos motores diesel. Como exemplo, para o motor diesel A, existem 3 períodos de análise de dados denominados de A-1, A-2 e A-3, assim divididos por ter havido *overhauls* sucessivos no motor A. Os motores diesel A, B, C e E possuem a frequência de testes programada semanal enquanto para o motor diesel D, ela é quinzenal. Entretanto, nos períodos analisados, o intervalo médio entre testes realizados apontou para uma frequência real diferente da programada devido principalmente à espera de componentes para a sua manutenção. Como os motores se encontravam em regiões de logística complexa, o tempo de reparo para que se restabelecesse o equipamento era considerável e, em alguns casos, os testes eram interrompidos por longos períodos de tempo. Desta forma, embora teoricamente, segundo os procedimentos, alguns MD sejam testados semanalmente e outros quinzenalmente, na prática, da análise dos dados foi concluído que os 10 períodos avaliados para os 5 MD objeto da pesquisa devem ser na realidade agrupados em 3 períodos com frequência aproximadamente semanal, 5 com frequência aproximadamente quinzenal e 2 com frequência aproximadamente mensal (Tabela 2- Períodos de análise e taxas de falha obtidas

).

⁷É uma medida do grau de exigência dos motores frente a sua aplicação. Depende de fatores como regime de operação, horas de trabalho anuais e tempo esperado entre *overhauls* (DEMPSEY, 2008).

Tabela 2- Períodos de análise e taxas de falha obtidas

Denominação do Motor Diesel	Denominação do período de análise	Período de análise		Frequência programada no CMMS ⁽⁵⁾	Intervalo médio entre testes realizados (dias)	Frequência real de testes	Nº de testes realizados no período (S+FC+FD)	Nº de falhas críticas no período (FC)	Nº de falhas degradadas no período (FD)	Nº de falhas Totais	Taxa de falha (1/h)
A	A-1	28/11/07	27/11/08	Semanal	17	Quinzenal	23	2	4	6	6,85E-04
	A-2	09/05/10	22/11/11		27	Mensal	22	3	5	8	5,93E-04
	A-3	10/11/12	04/05/16		11	Semanal	119	0	0	1	3,28E-05
B	B-1	28/11/07	02/05/09	Semanal	17	Quinzenal	24	1	4	5	4,00E-04
	B-2	06/02/11	25/11/15		29	Mensal	61	3	6	9	2,14E-04
C	C-1	28/11/07	22/11/11	Semanal	20	Quinzenal	73	1	8	9	2,58E-04
	C-2	16/04/14	27/02/16		8	Semanal	88	0	5	5	3,05E-04
D	D-1	04/05/13	07/05/16	Quinzenal	18	Quinzenal	61	2	3	5	1,90E-04
E	E-1	09/12/08	27/04/11	Semanal	12	Quinzenal	74	2	2	4	1,92E-04
	E-2	02/04/14	27/04/16		8	Semanal	97	0	1	1	5,51E-05

Como nos testes periódicos as opções possíveis de diagnósticos são o equipamento operacional (status “S”), equipamento que não partiu (status “FC”) e equipamento com falha, porém conseguiu partir (status “FD”), o número de testes realizados em um determinado período corresponde à soma dos registros com esses 3 status.

Cabe ressaltar, entretanto, que esses são os testes funcionais programados periodicamente pelos operadores e não apenas esses são considerados válidos para diagnóstico da funcionalidade do motor diesel. Apesar de raras, demandas reais em que o gerador de emergência a diesel é exigido a operar como, por exemplo, na ocasião de queda da geração principal, também se configuram como testes válidos, contudo, em muitos casos não são registrados como testes no *CMMS*.

Além dessa limitação, foi significativa a incidência dos registros em que não foi possível verificar o resultado do teste devido à ausência de dados. Para estes, um cruzamento de informações foi necessário, sendo que ainda assim, caso não houvesse conclusão, classificou-se com o status “I” de Indeterminado.

Os registros indeterminados somados aos testes não-realizados distorcem a análise e tornam irregulares e não uniformes os intervalos entre testes. O não cumprimento rigoroso das datas planejadas para os testes, muitas vezes em vários testes consecutivos, leva a uma grande variabilidade dos intervalos de testes.

4.3 Análise dos períodos

4.3.1 Taxa de falha e Probabilidade de falha para cada período

Para a estimativa da taxa de falha e probabilidades de falha dos geradores diesel foi considerada a totalidade das falhas, críticas e degradadas, assumindo que a partida em condições degradadas acontece tipicamente com potência reduzida e/ou tensão inadequada, de modo que as funções de segurança dependentes da alimentação elétrica de emergência não podem ser garantidas nessas condições.

Para cada intervalo analisado, avaliou-se a tendência da taxa da falha e da probabilidade de falha como função do tempo até convergir aos valores médios do intervalo total, dados pelas expressões:

$$\hat{\lambda} = \frac{n(T)}{T} \quad (4.1)$$

$$\widehat{A}^*(\infty) = \frac{n(T)}{N(T)} \quad (4.2)$$

onde $n(T)$ é o número total de falhas registradas no intervalo total de tempo T e $N(T)$ é o número total de demandas no intervalo total T .

Para a análise de tendência, as estimativas intermediárias da taxa de falha $\hat{\lambda}(t_i)$ e a probabilidade de falha $\widehat{A}^*(\infty)(t_i)$ foram calculadas para os tempos t_i ; $i = 1, 2, 3, \dots, n(T)$ dos testes onde aconteceram as falhas, mediante as expressões:

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{n(t_i)}{t_i}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n(T) - 1 \quad (4.3)$$

$$\widehat{A}^*(\infty)(t_i) = \frac{n(t_i)}{N(t_i)}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n(T) - 1 \quad (4.4)$$

Onde $n(t_i)$ é o número de falhas registradas até o tempo t_i e $N(t_i)$ é o número total de demandas até o tempo t_i .

Para o tempo da última falha se assume o valor médio total do intervalo:

$$\hat{\lambda}(t_{n(T)}) = \frac{n(T)}{T} = \hat{\lambda} \quad (4.5)$$

$$\widehat{A}^*(\infty)(t_{n(T)}) = \frac{n(T)}{N(T)} = \widehat{A}^*(\infty) \quad (4.6)$$

A seguir será analisado de forma detalhada o período A-1, destacando a sequência de testes que realmente foi realizada, o resultado de sucesso ou falha em cada teste, e a determinação da tendência da taxa de falha e a probabilidade de falha médias para os tempos intermediários (expressões 4.3 e 4.4

respectivamente) até convergir ao valor médio final para o intervalo total (expressões 4.5 e 4.6 respectivamente). Os períodos restantes de A-2 a E-2, serão analisados de forma geral e resumida, sendo que para mais detalhes, seus gráficos estarão no **Apêndice B**. A ferramenta utilizada para a realização dos cálculos supracitados foi o *software* Excel®, versão 2016.

- A-1:

O intervalo médio entre testes desse período foi de 17 dias. O gráfico abaixo (Figura 15) mostra a sequência dos testes nos tempos em que realmente estão sendo realizados através dos resultados de falha ou sucesso.

A menor escala do gráfico está configurada para 7 dias, ou seja, em cada marca de escala do gráfico, deveria haver um resultado de sucesso ou falha, porém, existem intervalos de tempo em que não foi possível o diagnóstico do resultado do teste porque o mesmo não foi executado (equipamento em manutenção, questões operacionais, etc.). Neste período, portanto, considerou-se que a frequência real de testes é quinzenal.

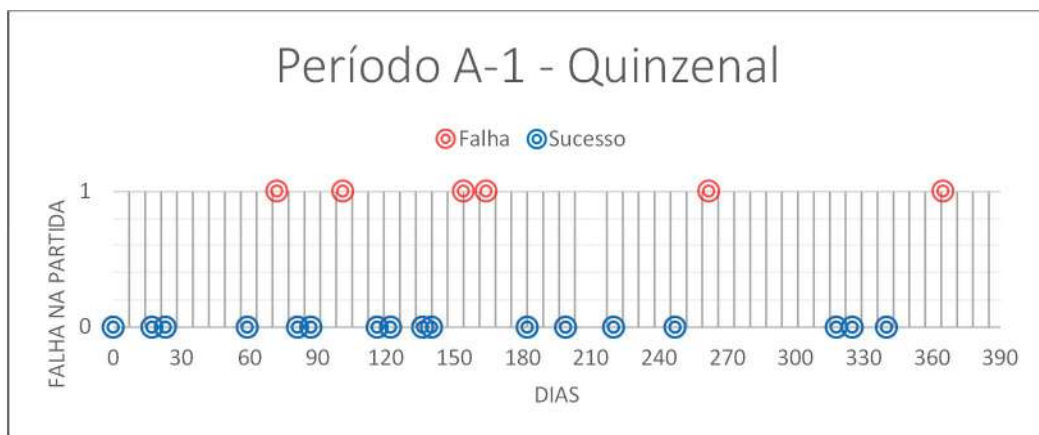


Figura 15 - Período de Testes A-1 com frequência quinzenal

A curva de taxa de falha se mantém aproximadamente constante ao longo do tempo (Figura 16), o que reafirma que o motor diesel se encontra no período de vida útil.

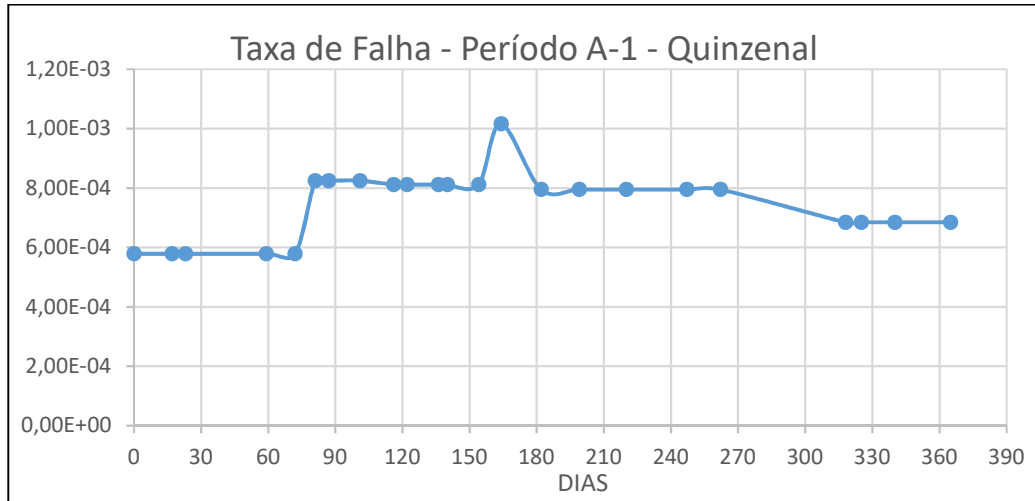


Figura 16 - Taxa de falha ao longo do período A-1

A probabilidade de falha ou indisponibilidade varia ao longo do período na medida em que as falhas vão ocorrendo.

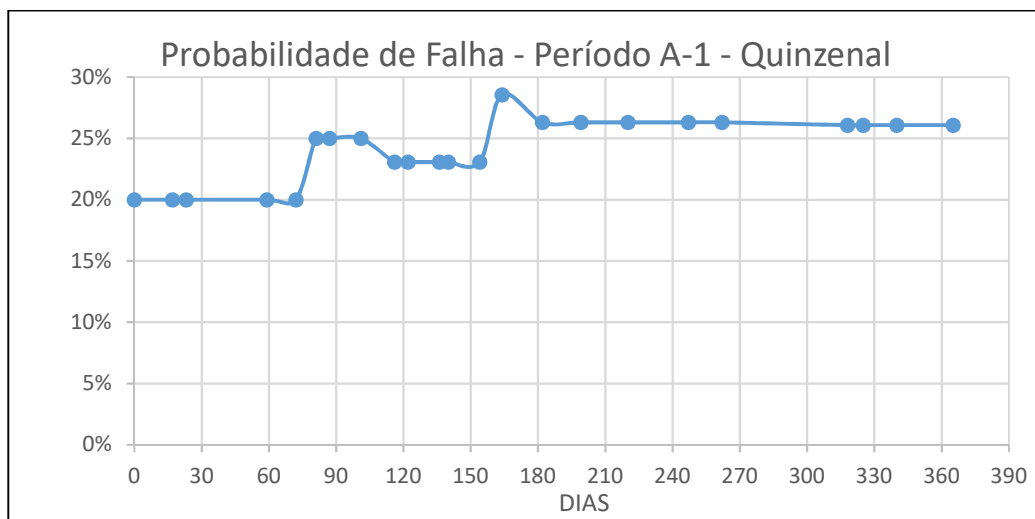


Figura 17 - Probabilidade de falha ao longo do período A-1

No que se refere aos períodos restantes, há uma tendência de elevada taxa de falha inicial seguida de uma progressiva redução,

observadas nos períodos A-2, B-1, B-2, C-1, C-2, D-1 e E-1 - Tabela 3 e Figura 18.

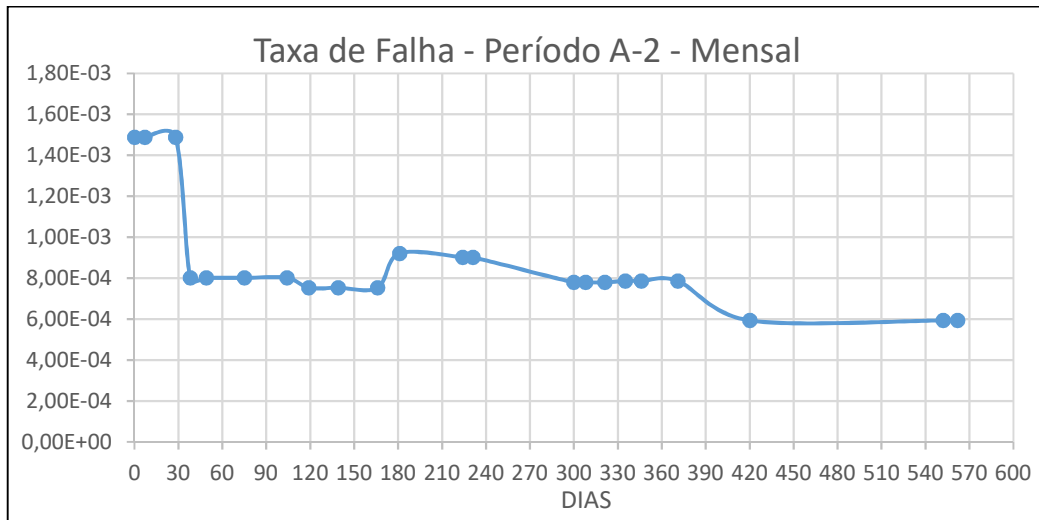


Figura 18 - Exemplo de comportamento de falha observado em diversos períodos de análise

Isso sugere que na medida em que o tempo transcorre a partir do último *overhaul*, os MD demonstram um comportamento inicial de falhas infantis, provavelmente associado a defeitos relacionados a matérias-primas e operações de manufatura (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009), de modo que os MD passam por um período de amaciamento mesmo depois de um ano do *overhaul*.

Tabela 3 - Resumo do comportamento das curvas de taxa de falha por período

Períodos	Curva da taxa de falha
A-1	Constante
A-2	Decrescente
A-3	Constante
B-1	Decrescente
B-2	Decrescente
C-1	Decrescente
C-2	Decrescente
D-1	Decrescente
E-1	Decrescente
E-2	Constante

4.3.2 Ensaios de confiabilidade nos dados de falha obtidos

Para comprovar se o comportamento dos MD segue ou não o modelo exponencial de falhas após os *overhaul*, foi feita uma adaptação dos gráficos de probabilidade utilizados nos ensaios de confiabilidade (FRUTUOSO E MELO, 2013).

Foi assumido que os intervalos de tempo entre duas falhas consecutivas do mesmo componente correspondem aos tempos de falha de componentes diferentes para estudar a sequência de tempos de falha apresentados pelos MD objeto de estudo. Para simplificar o entendimento, segue o diagrama abaixo que ilustra um mesmo MD submetido a testes e identificadas 3 falhas em 3 testes no período (Figura 19).

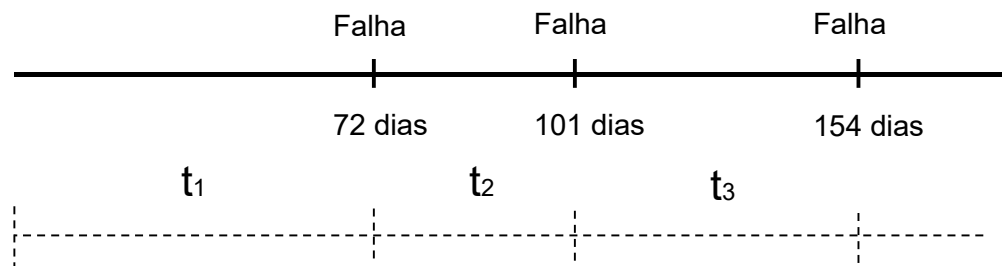


Figura 19 - Diagrama que ilustra dados de falha agrupados

Coletou-se os dados dos tempos entre falhas do MD conforme Fig. 19 e reordenando-os em 3 MD distintos que possuem o tempo para falha dado pelos t_i coletados no período (Figura 20) (FRUTUOSO E MELO, 2013).

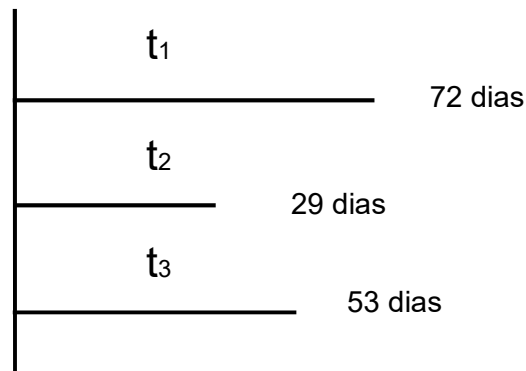


Figura 20 - Dados de falha não-agrupados

Adicionalmente, foi determinado o comportamento da taxa de falha cumulativa $H(t)$. A taxa de falha cumulativa é definida pela expressão (FRUTUOSO E MELO, 2013):

$$H(t) = -\ln R(t) = \lambda t \quad (4.7)$$

E sua estimativa é dada por:

$$\widehat{H}(t) = \ln(N + 1) - \ln(N + 1 - i) \quad (4.8)$$

A partir do formato da curva de $H(t)$ (Figura 21), observa-se facilmente que os pontos não se encontram em linha reta, ou seja, os componentes em questão não possuem taxa de falha constante e, portanto, seus tempos de falha claramente não seguem uma distribuição exponencial (FRUTUOSO E MELO, 2013).

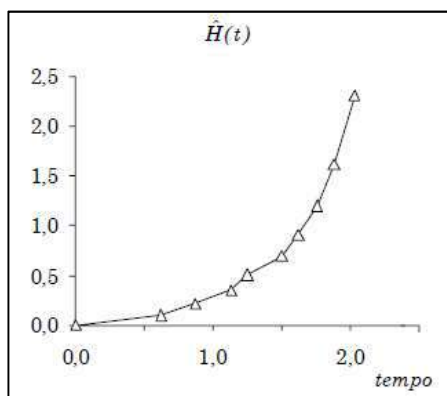


Figura 21-Taxa de falha cumulativa $H(t)$ (FRUTUOSO E MELO, 2013)

Abaixo na Figura 22, segue exemplo do comportamento da taxa de falha acumulada, em que o formato da reta é aproximadamente linear. Isto sugere que o modelo é exponencial.

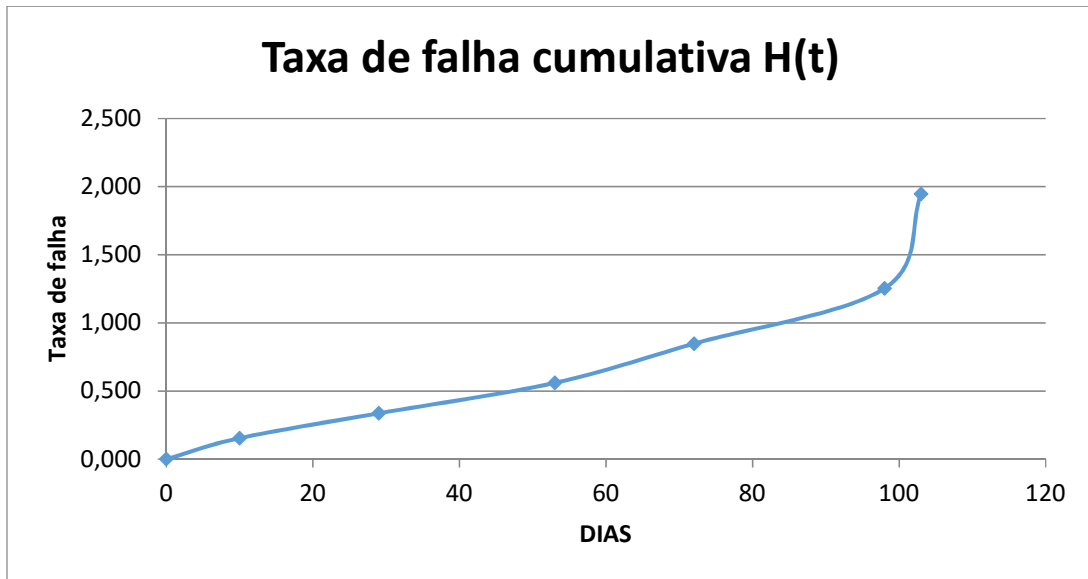


Figura 22 - Taxa de falha cumulativa do período A-1

Além da linearidade da curva $H(t)$, efetuaremos o cálculo do parâmetro de forma “m” da distribuição de Weibull.

A função acumulada para a distribuição de Weibull é dada por:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m\right], t \geq 0, \theta \geq 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{1 - F(t)} = \exp\left[\left(\frac{t}{\theta}\right)^m\right] \quad (4.10)$$

Tomando o logaritmo natural duas vezes membro a membro:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = m \ln t - m \ln \theta \quad (4.11)$$

O coeficiente angular “m” da expressão 4.11 é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull (FRUTUOSO E MELO, 2013). Por meio da construção dos gráficos na ferramenta Excel® e interpolação linear a partir do método de mínimos quadrados, foi possível a obtenção do parâmetro de forma conforme exemplo abaixo para o período A-1 em que o valor obtido foi $m \cong 1$ reafirmando o modelo exponencial.

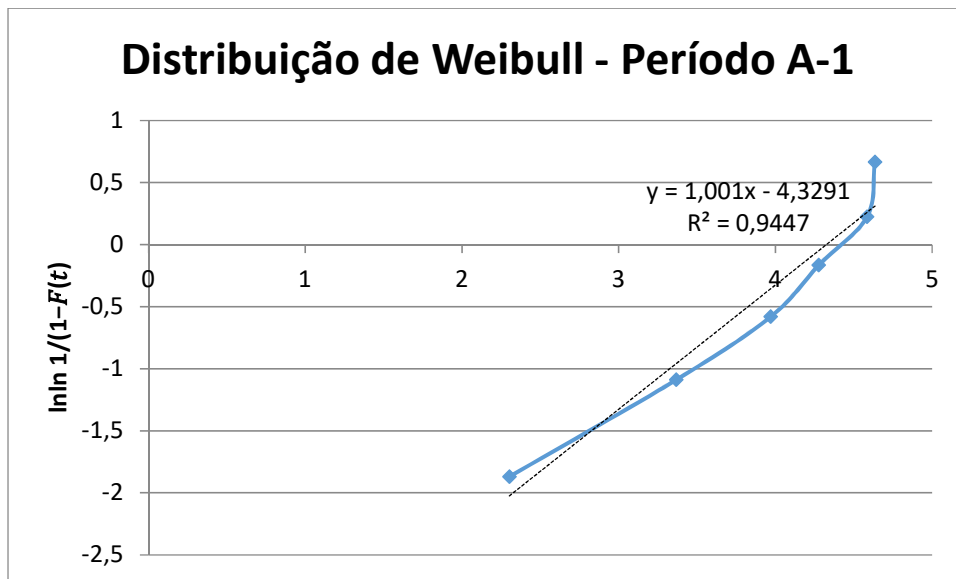


Figura 23 – Gráfico de parâmetros da distribuição de Weibull para período A-1

No que se refere aos períodos restantes de A-2 a E-2, seus resultados estão resumidos na Tabela 4. O que pode ser observado é que A-1, A-3, B-1 e E-2 possuem comportamento exponencial de falha.

Cabe ressaltar que no período A-3 não foi registrada nenhuma falha dentro dos 1400 dias. Está claro que esta evidência não permite concluir que a taxa de falha seja zero e provavelmente isso está relacionado à qualidade dos registros. Nestas condições, a análise de dados se realiza assumindo que uma falha poderia acontecer imediatamente depois do intervalo, de onde resulta uma taxa de falha constante $\hat{\lambda} = \frac{1}{T}$, onde T é o tempo total do período A-3.

Outra ressalva é que o método de cálculo do parâmetro de forma indica apenas se o modelo é exponencial quando $m \cong 1$, porém quando seu valor é diferente de 1, não é possível inferir que a fase é de falhas infantis (para $m < 1$) ou de envelhecimento ($m > 1$), apenas que não é taxa de falha constante.

Para concluir se as falhas são decrescentes (característico da fase de mortalidade infantil) ou se são crescentes (característico da fase de envelhecimento), recorreremos ao comportamento da curva de taxa de falha simplesmente.

Para mais detalhes, seus gráficos estão no **Apêndice C**.

Tabela 4 - Resumo da tendência das curvas de taxa de falha x parâmetros de forma Weibull

Períodos	Taxa de falha acumulada H(t)	Parâmetro de forma Weibull
A-1	Linear	1,00
A-2	Não-linear	1,63
A-3	Linear	1,00
B-1	Linear	0,91
B-2	Não-linear	0,82
C-1	Não-linear	1,32
C-2	Não-linear	1,38
D-1	Não-linear	0,85
E-1	Não-linear	0,69
E-2	Linear	1,00

5. Resultados

Foi construída uma média das taxas de falha e probabilidades de falha dos motores diesel (MD) correspondentes às 3 estratégias resultantes de testes semanais, quinzenais e mensais, pesando os valores médios dos intervalos específicos com a duração de cada um deles (Tabela 5 e Tabela 6).

Os valores totais para os MD agrupados por intervalos de testes mostram que o comportamento da taxa de falhas e a indisponibilidade média praticamente não mudam para testes quinzenais ou mensais, enquanto os MD testados semanalmente apresentam uma maior confiabilidade medida na resposta aos testes periódicos. Este comportamento está dominado pelos intervalos A-3 e E-2, onde foi registrada de forma conjunta apenas uma falha em 217 testes, durante um período total de 5,86 anos. Nestes casos não aparecem falhas posteriores ao *overhaul*. Este comportamento atípico poderia estar relacionado com incertezas na informação do sistema de coleta de dados, de modo que não deve ser considerado um resultado que fundamente a superioridade de realizar testes extremamente frequentes (semanais).

Tabela 5 - Médias das taxas de falha e probabilidade de falha dos MD

Intervalo de teste (dias)	MD A		MD B		MD C		MD D		MD E	
	$\hat{\lambda}$ Média [h ⁻¹]	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média	$\hat{\lambda}$ Média [h ⁻¹]	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média	$\hat{\lambda}$ Média [h ⁻¹]	$\hat{\lambda}$ Média	$\hat{\lambda}$ Média [h ⁻¹]	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média	$\hat{\lambda}$ Média [h ⁻¹]	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média
7	3,28E-5	8,33E-3	3,05E-4	5,68E-2	5,51E-5	1,03E-2	-----	-----	-----	-----
15	6,85E-4	2,61E-1	5,08E-4	2,08E-1	2,58E-4	1,23E-1	1,90E-4	8,20E-2	1,92E-4	5,41E-2
30	5,93E-4	3,64E-1	2,14E-4	1,48E-1	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabela 6 - Comparativo por frequência de teste

Frequência de teste (dias)	Total	
	$\hat{\lambda}$ Média [h ⁻¹]	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média
7	1,08E-4	2,11E-2
15	2,88E-4	1,18E-1
30	3,06E-4	2,00E-1

Os resultados globais foram comparados com os reportados na base de dados OREDA para componentes similares, ou seja, motores diesel para geração de emergência. Infelizmente, na base de dados OREDA existiam registros apenas de nove unidades correspondentes a 8 instalações, mas chama a atenção que a taxa de falha para estes motores diesel resulta inferior em uma ordem de grandeza. O valor reportado no OREDA (2015), que incluem falhas na partida e falhas degradadas, é $4,578E-5h^{-1}$ (Tabela 7).

Tabela 7 - Taxas de falha para motores diesel com aplicação de geração de emergência. Fonte: OREDA, 2015.

	Média (1/h)
Falha na partida	3,14E-06
Falha degradada	4,26E-05
TOTAL	4,58E-05

Na Tabela 8 são comparados os valores de indisponibilidade média que apresentariam os motores diesel objeto de estudo ($\frac{1}{2}\lambda T$) para valores do intervalo de testes (T) de 7, 15 e 30 dias, respectivamente com os correspondentes aos motores diesel da base de dados OREDA.

Tabela 8-Comparação dos resultados com o OREDA

Intervalo de teste (dias)	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média esperada frente a uma demanda real para os motores diesel estudados	$\widehat{A}^*(\infty)$ Média esperada frente a uma demanda real para os motores diesel da base de dados OREDA 2015
7	9,04E-3	3,85E-3
15	5,18E-2	8,24E-3
30	1,10E-1	1,65E-2

Estes resultados mostram que, desconsiderando os motores diesel testados semanalmente onde os dados coletados não parecem realistas, nos casos restantes, que correspondem à maioria dos motores diesel estudados (7 de 10), a confiabilidade dos geradores diesel avaliados resulta muito menor. Os problemas parecem estar associados a taxas de falha relativamente altas na etapa inicial de cada intervalo posterior ao *overhaul*, de modo que parece importante recomendar uma análise da efetividade do *overhaul* e seu sistema de garantia de qualidade.

Adicionalmente, torna-se importante melhorar substancialmente o sistema de coleta de dados para poder medir com menor grau de incerteza a efetividade da política de testes periódicos.

Além disso, é importante fortalecer o sistema de garantia de qualidade nos aspectos de planejamento e cumprimento efetivo dos programas de teste, pois os longos períodos onde os testes programados não foram realizados por problemas operacionais resultam inaceitáveis e muito negativos para a confiabilidade das unidades diesel.

Além da análise do efeito da frequência de testes no desempenho do GDE, outra análise era o atendimento ou não do critério de desempenho da disponibilidade de 95% (ou indisponibilidade máxima de 5%) exigida pela RM para cada um dos trens de GDE. Cabe ressaltar que como se está avaliando apenas os motores diesel, seria necessária a inclusão dos geradores elétricos para um estudo mais completo.

Na Tabela 9, estão as indisponibilidades médias dos períodos analisados para cada um dos MD. Apenas o MD E atenderia o critério e seria monitorado em a(2) pela RM, ou seja, sua política de testes se manteria como está e seria continuamente monitorado para verificar se seu desempenho se mantém.

Tabela 9- Indisponibilidades médias dos MD

	MD A	MD B	MD C	MD D	MD E
$\bar{A}^*(\infty)$ média	21%	14%	7%	8%	5%

Os MD A, B, C e D não atendem ao critério de desempenho. Estes devem ser classificados em a(1) pela RM, ou seja, deve ser definida uma meta mais rigorosa que 95% e um plano de ação deve ser criado para atingi-la.

6. Conclusões e Recomendações

Os resultados indicam que os MD que são testados semanalmente possuem uma disponibilidade média maior comparada aos com frequências de testes quinzenal e mensal e que a hipótese de degradação devido a testes frequentes não se confirma. Esta conclusão preliminar, entretanto, deve ser complementada com um espaço amostral maior de motores diesel e de dados de falha para que as conclusões sejam mais fundamentadas.

Contribuíram para dificuldade na análise, a forma como os registros de testes foi computada no *CMMS* através de campos não estruturados (campos livres de texto), sendo que para se efetuar a estatística, era necessária a abertura de cada registro do teste para se contabilizar o seu resultado.

Para que os dados fossem facilmente extraídos, é recomendada a criação de status de teste conforme a Tabela 1 no *CMMS* e que os mantenedores ao concluírem o teste, registrassem no sistema o seu resultado.

Um ponto de atenção é o período pós-*overhaul* em que se concentram as falhas, indicando que deve ser medida a efetividade das manutenções, verificando por exemplo, o emprego de sobressalentes melhor especificados ou o aprimoramento de procedimentos ou treinamento da mão-de-obra executante da manutenção.

Apesar dos GDE se localizarem geograficamente em pontos de logística complexa o que aumenta o tempo de chegada dos componentes, ressalta-se a importância do cumprimento dos testes nas datas programadas para que os níveis de segurança sejam mantidos nas condições definidas no projeto da instalação.

Como trabalhos futuros, é interessante a coleta de um espaço amostral de equipamentos maior, em seguida, caso seja verificada e confirmada a degradação devido a testes, mensurar o fator de degradação α para calibração do modelo proposto de cálculo da frequência ótima de testes.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 5462 Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1994. 37 p.

CATERPILLAR®, **Manual de Operação e Manutenção para Motores de Grupo Gerador para Energia Elétrica Principal, de Emergência e de Auxiliares Marítimos**. 2000.

CATO, WILLIAM; MOBLEY, KEITH. **Computer-managed Maintenance Systems: A Step-by-step Guide to Effective Management of Maintenance, Labor, and Inventory**. Elsevier Science & Technology Books. 2001.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **MANUTENÇÃO DE USINAS NUCLEOELÉTRICAS**. [S.l.: s.n.], 1991. 19 p.

CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR. **Guia de Seguridad 1.18 medida de la eficacia del mantenimiento en centrales nucleares**. Madrid, 2007.

DEMPSEY, P. **Troubleshooting and Repairing Diesel Engines**. 4. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2008. 390 p.

DIONÍZIO, D. P. **Tomada de Decisão na Manutenção de Geradores Diesel de Emergência de Centrais Nucleares por Redes Bayesianas**. 2014. 64 f., UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

FERRO, Newton José. **Incorporação de atributos de confiabilidade à Regra de Manutenção para a extensão de vida útil qualificada em sistemas de segurança de centrais nucleares**. 2011. 147 p., UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 265 p.

GLOSSÁRIO DA NRC. Disponível em: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/severe-accident.html>

GLOSSÁRIO de Segurança Nuclear. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/glossario.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2017.

KATO ENGINEERING®, **Manual de Instruções – Gerador de Corrente Alternada Padrão**. Mankato, 2004.

KIM, I.S et al. **Risk analysis of surveillance requirements including their adverse effects**. Reliability Engineering and System Safety, [S.I.], n. 45, p. 225-234, dez. 1993.

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

LEWIS, E.E., **Introduction to Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, Illinois, 1994.

MOUBRAY, J. **Reliability-Centered Maintenance**. Industrial Press, Inc, Oxford, 1997.

NUMARC MAINTENANCE WORKING GROUP. **Industry guideline for monitoring the effectiveness of maintenance at nuclear power plants**. [S.I.], 2011.

FRUTUOSO E MELO P. F. **Confiabilidade e Dados de Falha: curso de Engenharia da Confiabilidade**. Out. de 2010. 55 f. Notas de Aula.

FRUTUOSO E MELO P. F. **Atributos de Confiabilidade**. Out. de 2010. 30 f. Notas de Aula.

FRUTUOSO E MELO P. F. **Ensaaios de Confiabilidade**. 2013. 26 f. Notas de Aula.

SAMANTA, P. et al. **NUREG/CR-5994: Emergency Diesel Generator: Maintenance and Failure Unavailability, and Their Risk Impacts**. Nova Iorque: [s.n.], 1994. 211 p. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/044/26044983.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2015.

SINTEF e NTNU (Org.). **Offshore and Onshore Reliability Data Handbook: Topside Equipment**. 6. ed. [S.I.]: DNV.GL, 2015. 643 p. v. 1.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. 10 CFR 50.65, de 10 de jul. de 1991. **Requirements for monitoring the effectiveness of maintenance at nuclear power plants**. [S.I.], jul. 1991.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. 10 CFR 50, de 02 de dez. de 2015. Appendix A to Part 50—General Design Criteria for Nuclear Power Plants. **General Design Criteria for Nuclear Power Plants : Criterion 17—Electric power systems**. [S.I.], fev. 1991.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Regulatory Guide 1.155 - Station Blackout**, [S.I.]. Ago. de 1988.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Regulatory Guide 1.160- Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants**, [S.I.]. Mai. de 2012.

VESELY, W.E., DEMOSS, G.M., LOFGREN, E.V., GINZBURG, T., SAMANTA, P.K., BOCCINO, J.C. **Evaluation of Diesel Unavailability**

and Risk Effective Surveillance Test Intervals. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4810, 1987.

WORKSHOP ON MAINTENANCE RULES: IMPROVING MAINTENANCE EFFECTIVENESS, 2006, Madrid. Summary Report. Holanda: SENUF, 2006.

Apêndice A: Tabelas de cálculo para obtenção de metas na condição de *Station Blackout*

Tabelas para cálculo dos parâmetros de *Station Blackout* e obtenção de metas.

Tabela 10 - Configuração de Geradores instalados e sua classificação por grupos

Grupos de arranjo dos Geradores de Emergência CA^a		
Grupo de arranjo Geração CA	Número de Geradores ^b	Número de Geradores requeridos para operar o Sistema de remoção de calor residual ^c
A	3 ^d	1
	4	1
B	4	2
	5	2
C	2 ^d	1
	3 ^e	1
D	2 ^f	1
	3	2
	4	3
	5	3

^aGeradores diesel com aplicação especial, tais como as associadas com sistemas de spray do núcleo com alta-pressão em alguns reatores BWR, não são contabilizados na determinação de grupos de arranjo.

^bSe quaisquer geradores forem compartilhados entre unidades em locais que atendam diversas instalações, o número a ser considerado são os geradores dedicados a essa instalação.

^cEste número é baseado em todas as cargas requeridas para remover o calor de decaimento residual (incluindo sistemas de remoção de calor de decaimento residual) para atingir e manter um seguro desligamento em todas as unidades da instalação com fonte de energia externa.

^dPara geradores não compartilhados com outras instalações.

^ePara geradores compartilhados com outras instalações em locais que atendam diversas instalações.

^fPara geradores os quais cada trem é capaz de prover energia para mais de uma instalação em um local simultaneamente.

Fonte: US Nuclear Regulatory Commission, "Regulatory Guide 1.155 - Station Blackout", Agosto de 1988.

Tabela 11 - Configuração em P1, P2 e P3

Grupos característicos de projeto de geração externa				
Grupo	Característica de Projeto de geração externa			
	Instalações que possuem qualquer combinação dos seguintes fatores:			
	I ^a	SW ^b	SWR ^c	ESW ^d
P1	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2	1 ou 2
	1 ou 2	1	1 ou 2	3
	1 ou 2	3	1	1 ou 2
P2	Todas as outras instalações não incluídas em P1 ou P3			
	Instalações que se espera acontecer uma perda total de energia externa causada por falhas na transmissão de rede numa frequência igual ou maior que 1 vez a cada 20 anos, a não ser que a instalação possua procedimentos para recuperar a fonte de geração CA dentro de aproximadamente meia hora após uma falha da rede externa.			
	ou			
P3	Instalações que possuam alguma combinação dos seguintes fatores:			
	I	SW	SWR	ESW
	Qualquer I	5	2	Qualquer ESW
	Qualquer I	1,2,3 ou 4	1 ou 2	5
	Qualquer I	5	1	Qualquer ESW
	Qualquer I	4	2	1,2,3 ou 4
	1 ou 2	3	2	4
	3	3	2	3 ou 4
^a Veja a Tabela 5 para definições de independência de Grupos (I) de Geração Externa. ^b Veja Tabela 6 para definições de Grupos de clima severo (SW). ^c Veja Tabela 7 para definições de Grupos de Recuperação de Clima Severo (SWR). ^d Veja Tabela 8 para definições de Grupos de Clima extremamente severo.				

Fonte: US Nuclear Regulatory Commission, "Regulatory Guide 1.155 - Station Blackout", Agosto de 1988.

Tabela 12 - Metas de confiabilidade para Geradores Diesel de Emergência

Duração aceitável do Station Blackout (horas) ^a							
Grupo característico de Projeto da Energia Externa ^d	Grupo de Arranjo de Geração de Emergência ^b						
	A		B		C		D
	Confiabilidade média da unidade de GDE ^c						
	0,975	0,95	0,975	0,95	0,975	0,95	0,975
P1	2	2	4	4	4	4	4
P2	4	4	4	4	4	8	8
P3	4	8	4	8	8	16	8
^a Variações destes tempos serão considerados pela equipe se justificadas, incluindo uma análise de custo-benefício, é fornecida pelo operador. A metodologia e sensibilidade do estudo são apresentadas no NUREG-1032 (ref.2) são aceitáveis para uso na justificativa. ^b Veja Tabela 3 para determinar o Grupo de Arranjo de Emergência ^c Veja Posição regulatória 1.1 ^d Veja Tabela 4 para determinar grupos P1, P2 e P3.							

Fonte: US Nuclear Regulatory Commission, "Regulatory Guide 1.155 - Station Blackout", Agosto de 1988.

Apêndice B: Gráficos de taxa de falha e probabilidade de falha dos períodos A-2 a E-2

- A-2:

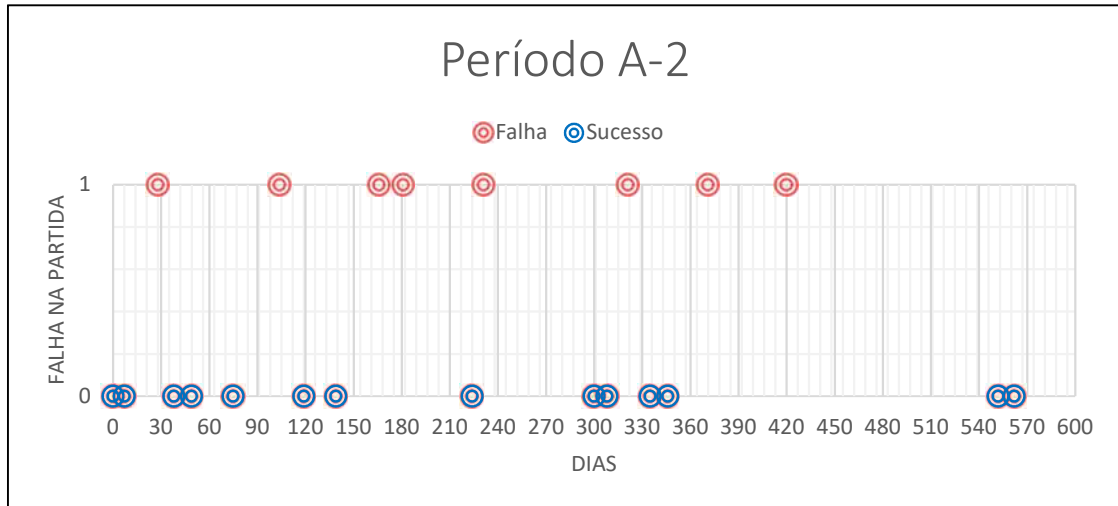


Figura 24 - Período de Testes A-2 com frequência mensal

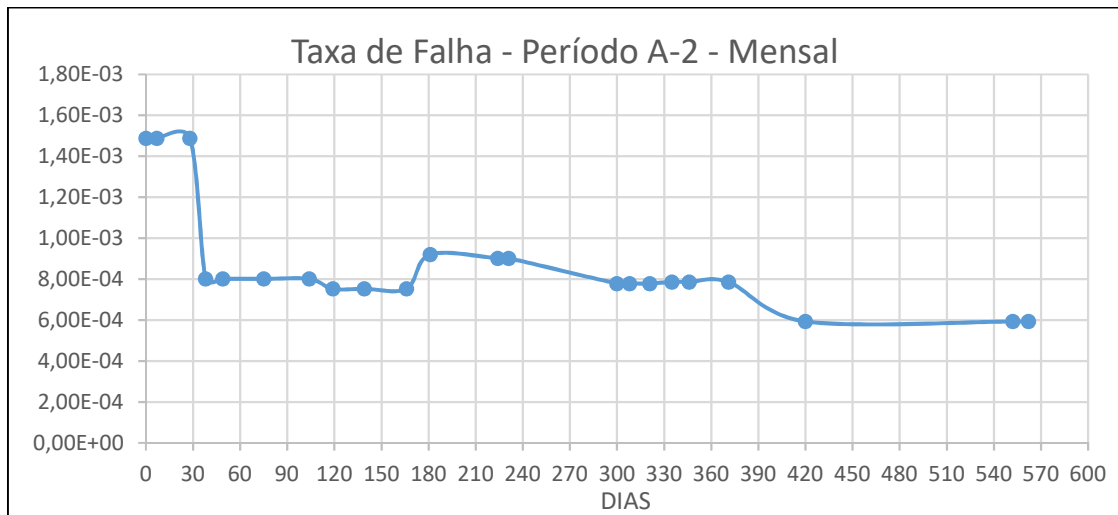


Figura 25 - Taxa de falha ao longo do período A-2

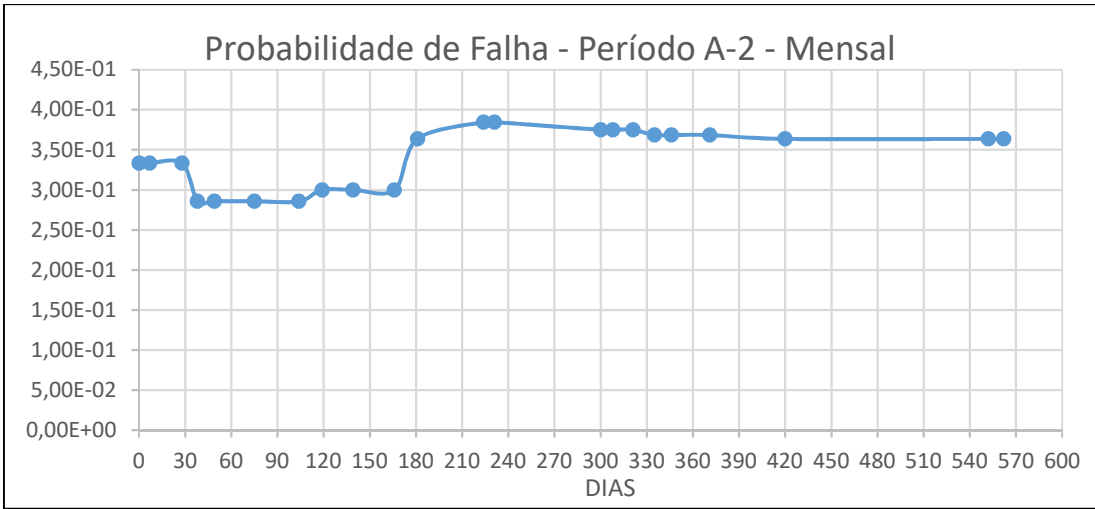
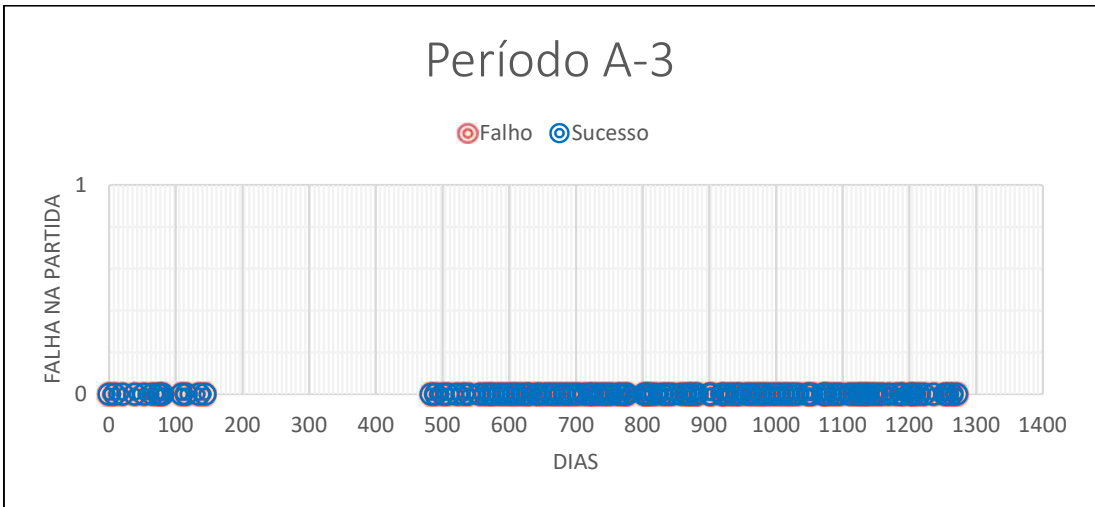


Figura 26 - Probabilidade de falha ao longo do período A-2

- A-3:



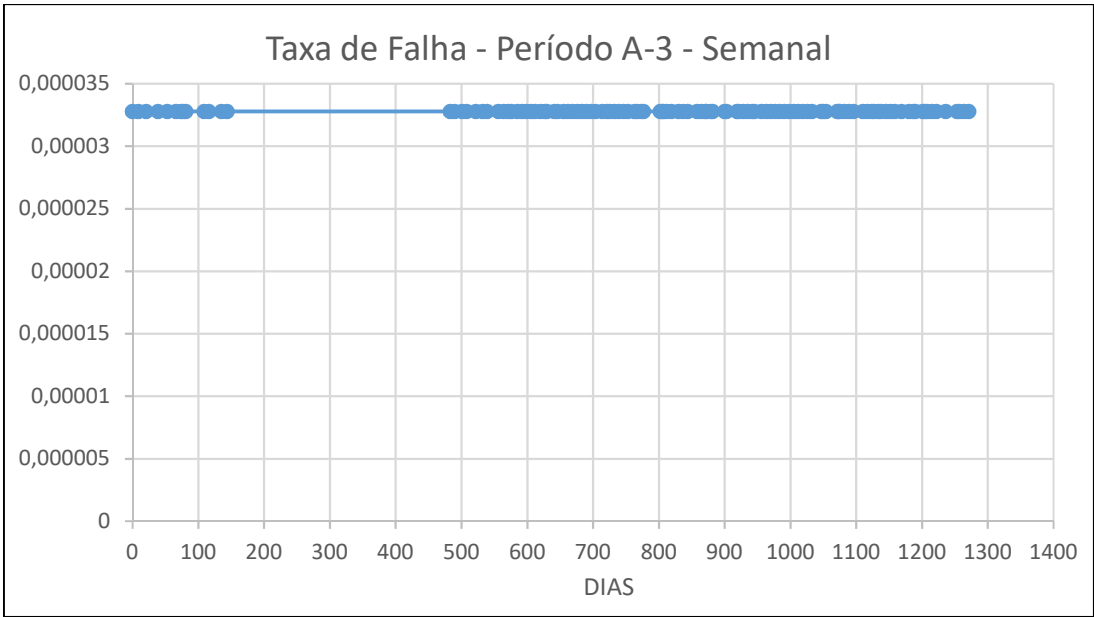


Figura 28 - Taxa de falha ao longo do período A-3

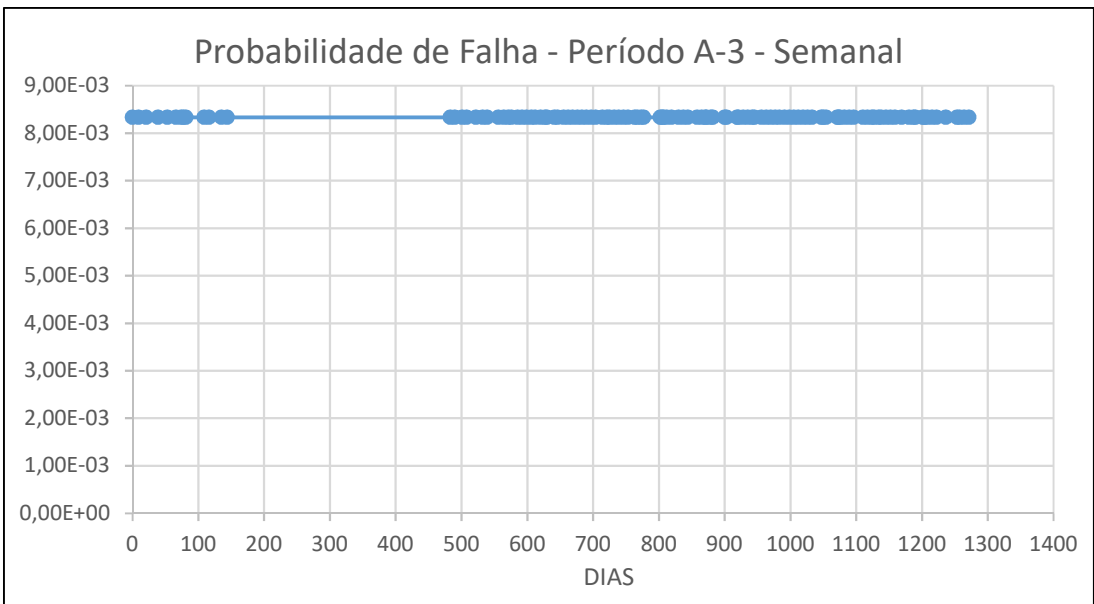


Figura 29 - Probabilidade de falha ao longo do período A-3

- B-1:

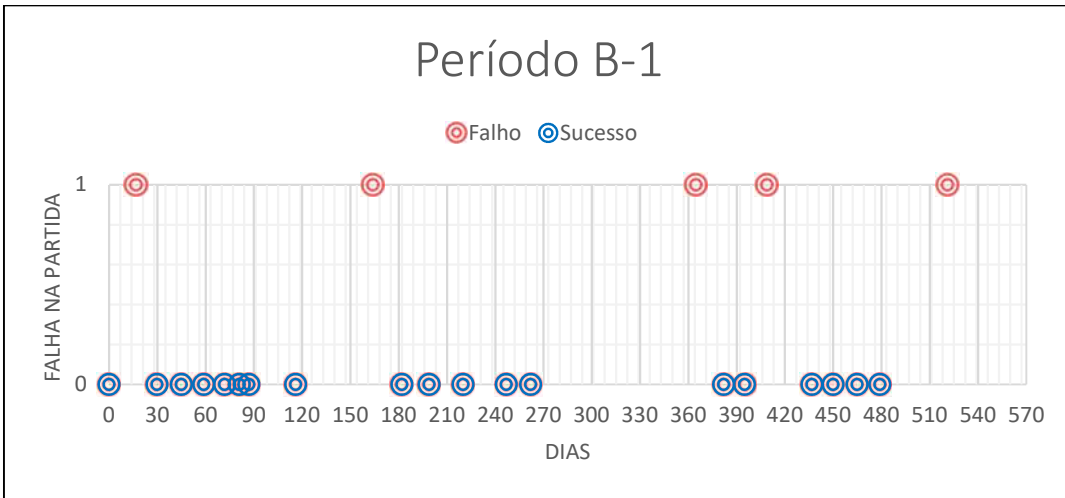


Figura 30 - Período de Testes B-1 com frequência quinzenal

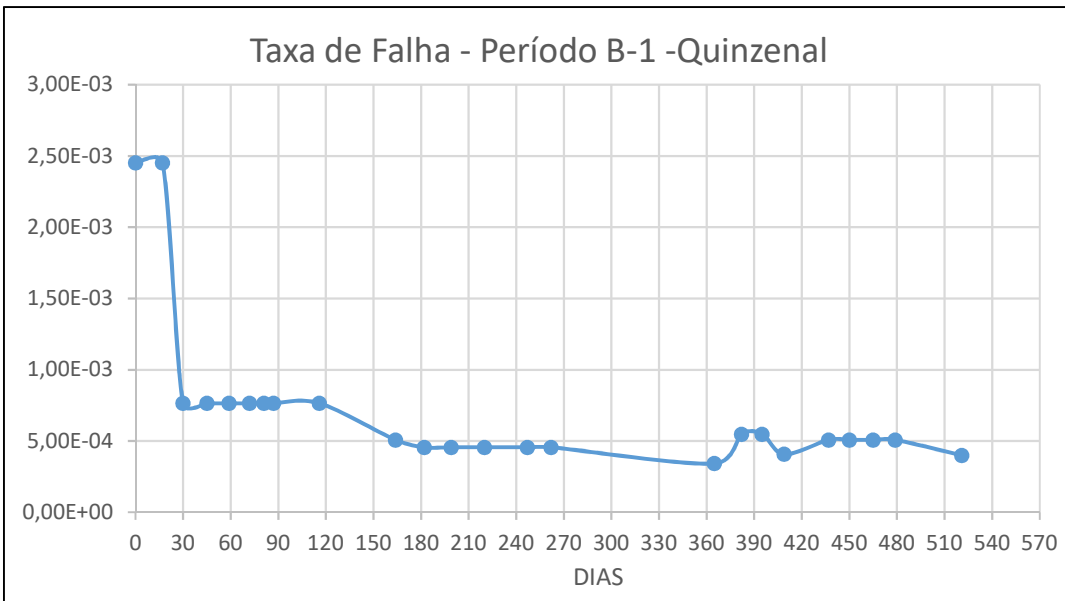


Figura 31 - Taxa de falha ao longo do período B-1

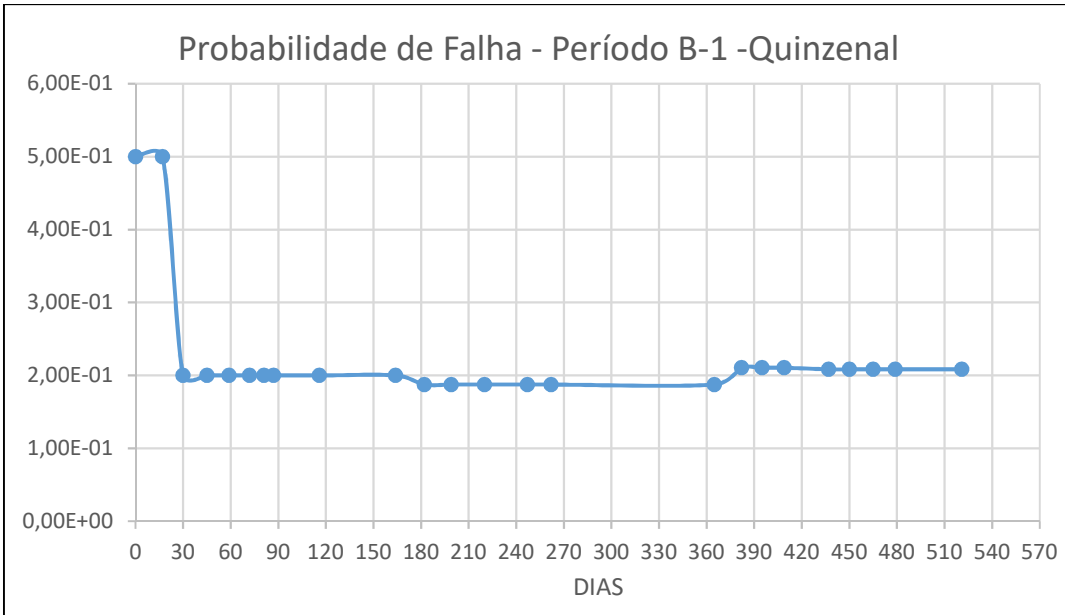


Figura 32 - Probabilidade de falha ao longo do período B-1

- B-2:

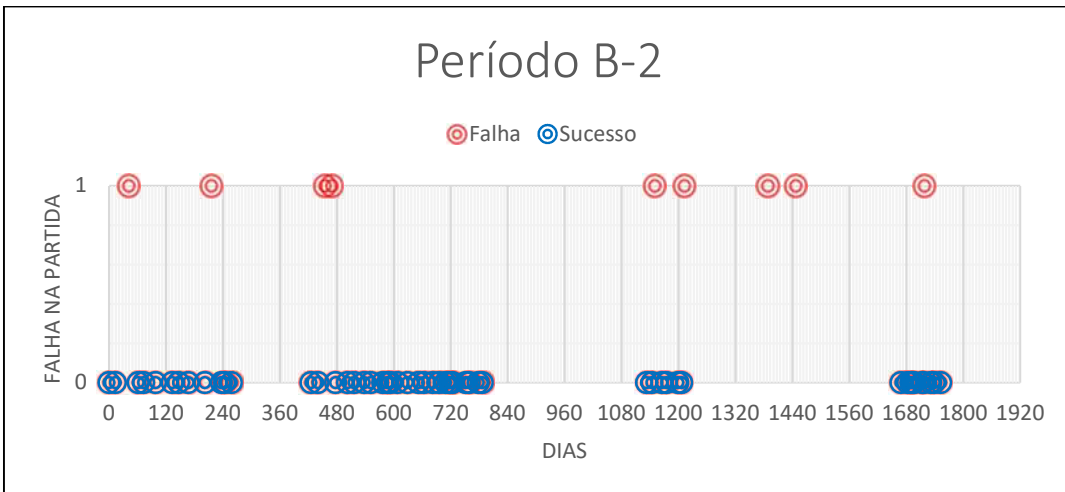


Figura 33 - Período de Testes B-2 com frequência mensal

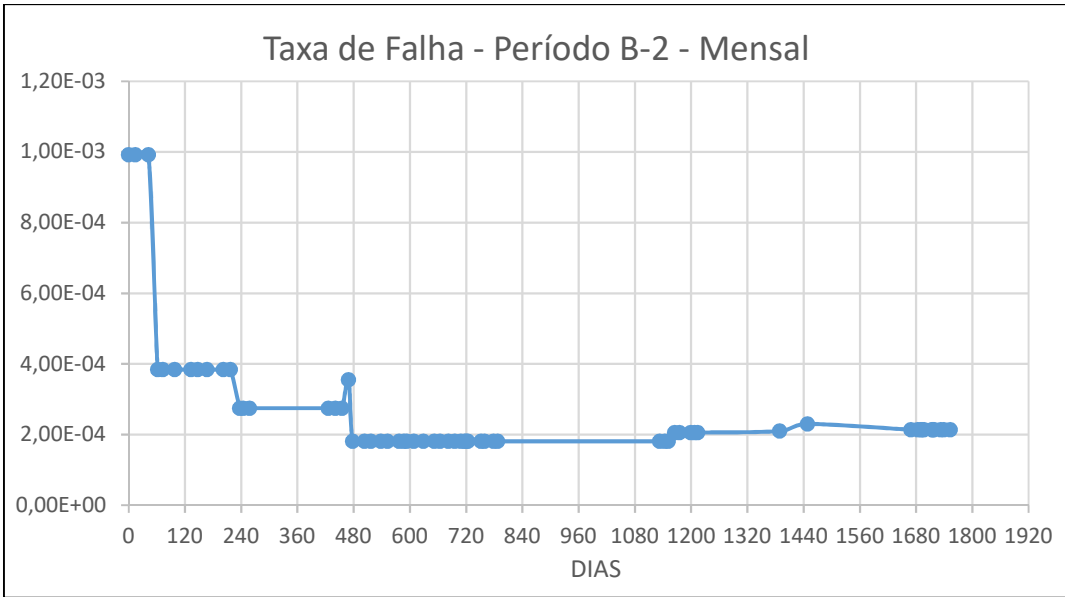


Figura 34 - Taxa de falha ao longo do período B-2

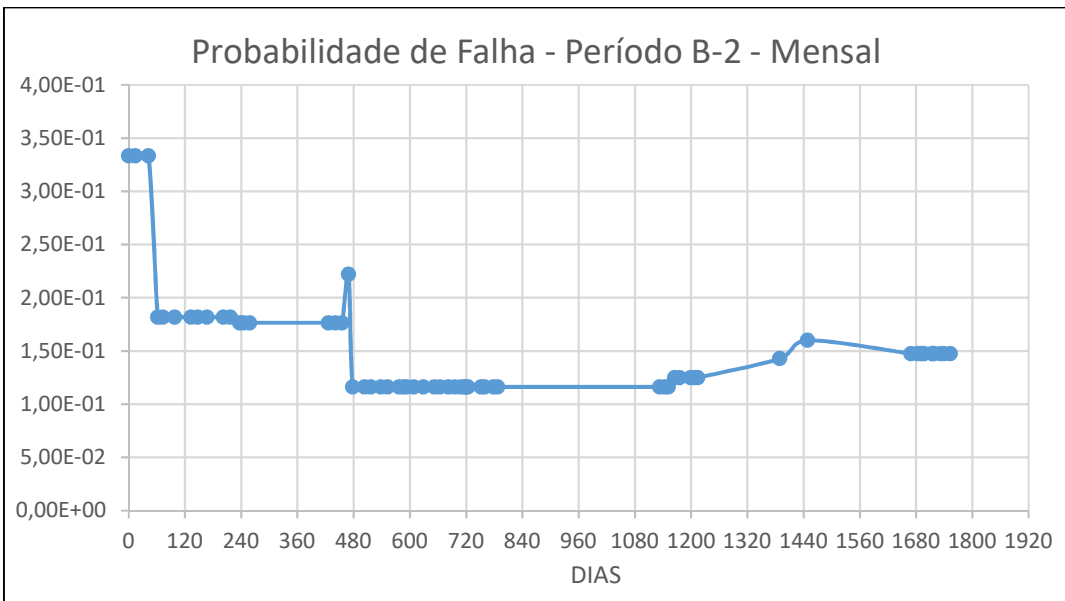


Figura 35 - Probabilidade de falha ao longo do período B-2

- C-1:

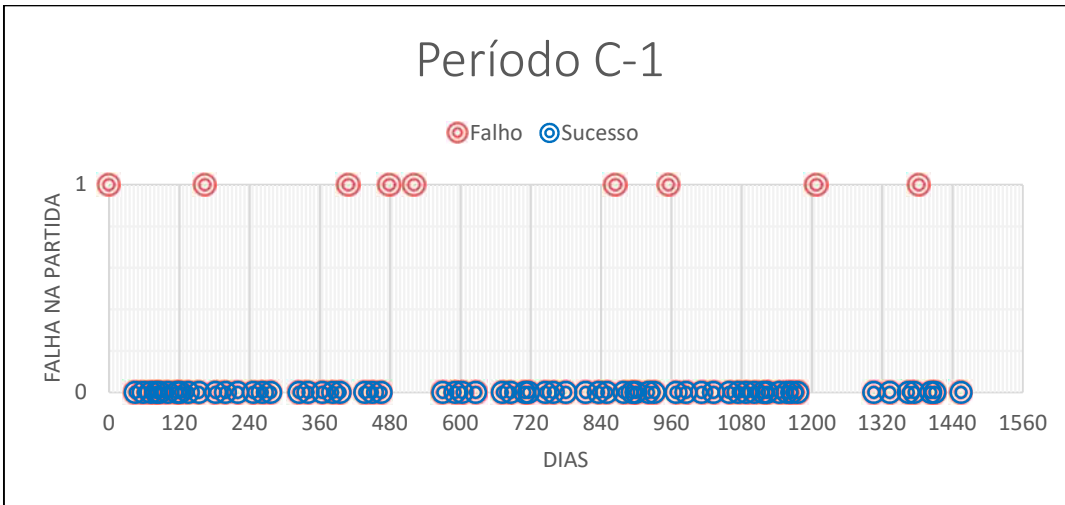


Figura 36 - Período de Testes C-1 com frequência quinzenal

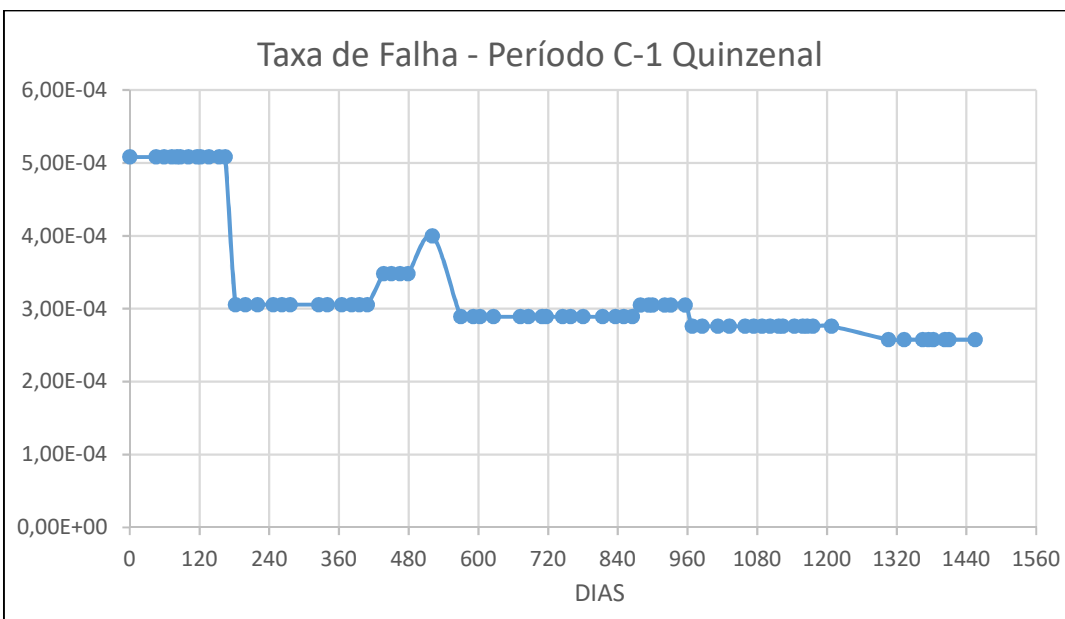


Figura 37 - Taxa de falha ao longo do período C-1

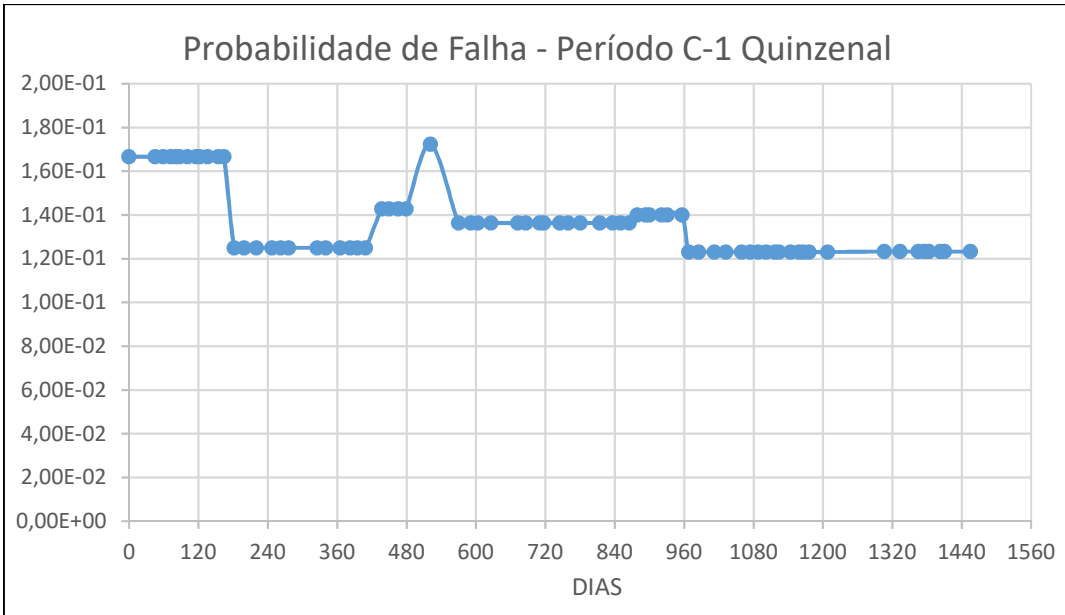


Figura 38 - Probabilidade de falha ao longo do período C-1

- C-2:

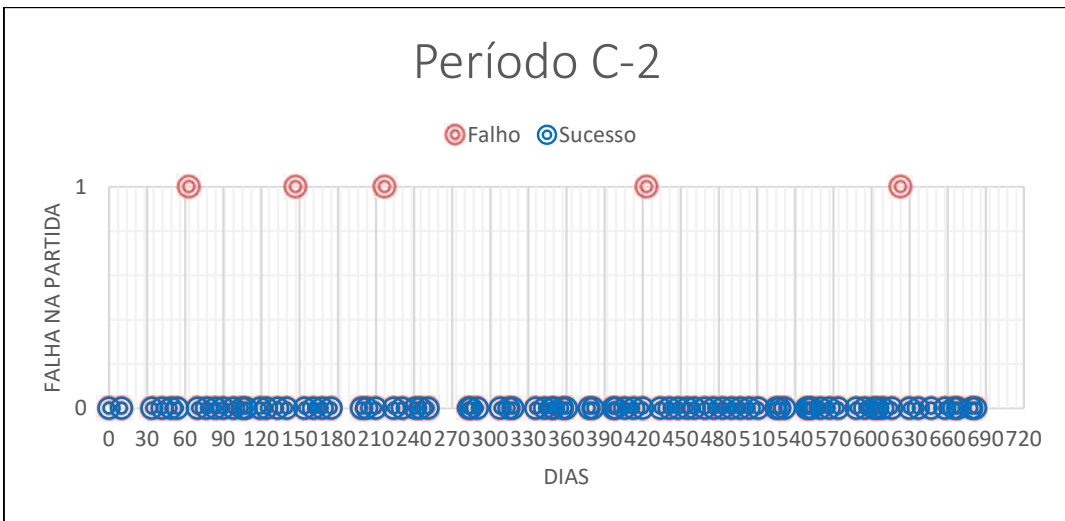


Figura 39 - Período de Testes C-2 com frequência semanal

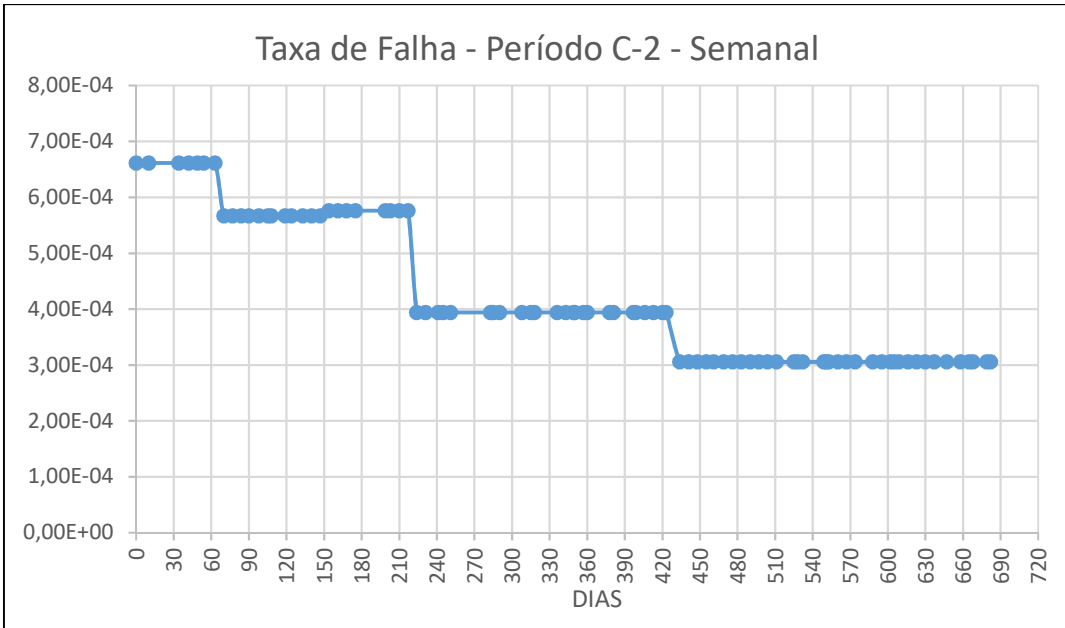


Figura 40 - Taxa de falha ao longo do período C-2

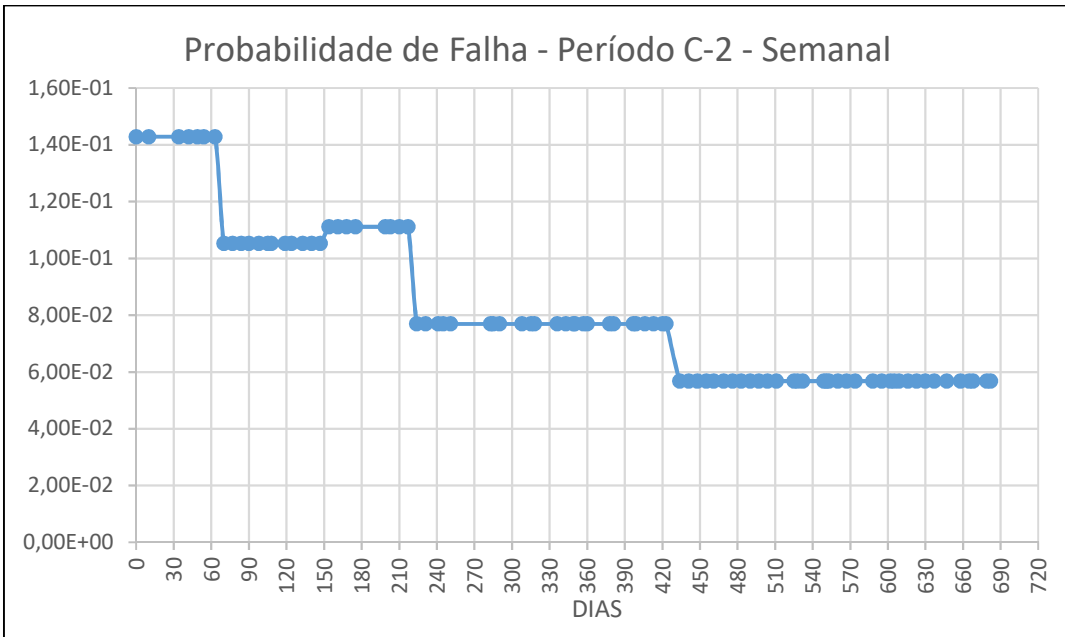


Figura 41 - Probabilidade de falha ao longo do período C-2

- D-1:

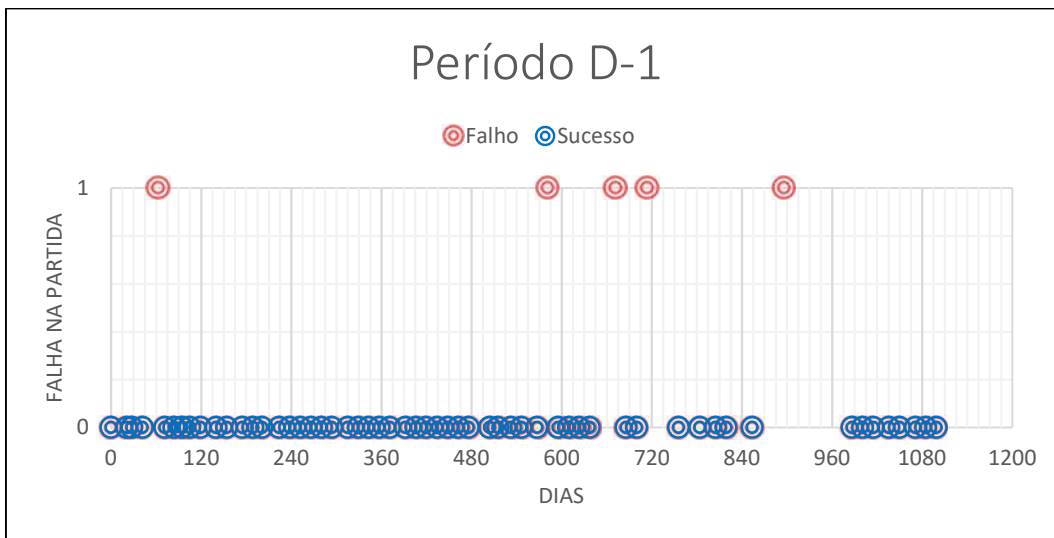


Figura 42 - Período de Testes D-1 com frequência quinzenal

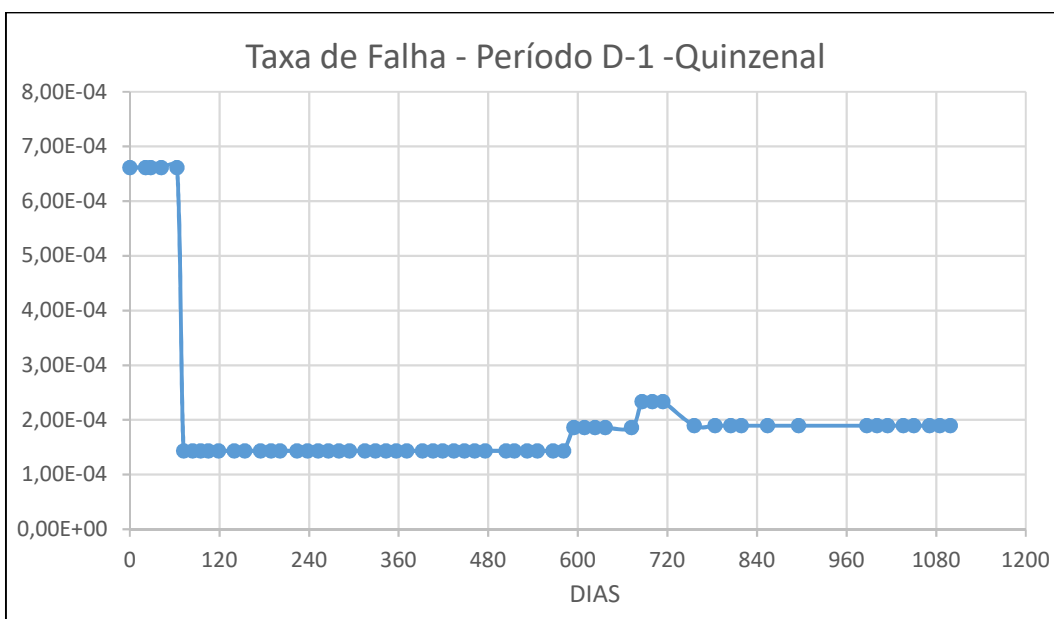


Figura 43 - Taxa de falha ao longo do período D-1

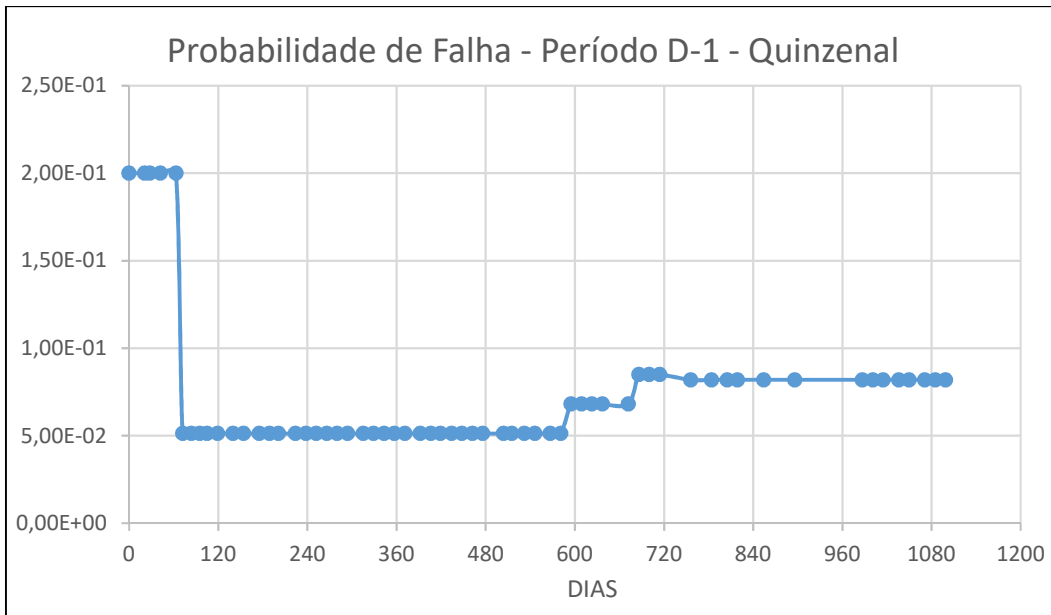


Figura 44 - Probabilidade de falha ao longo do período D-1

- E-1:

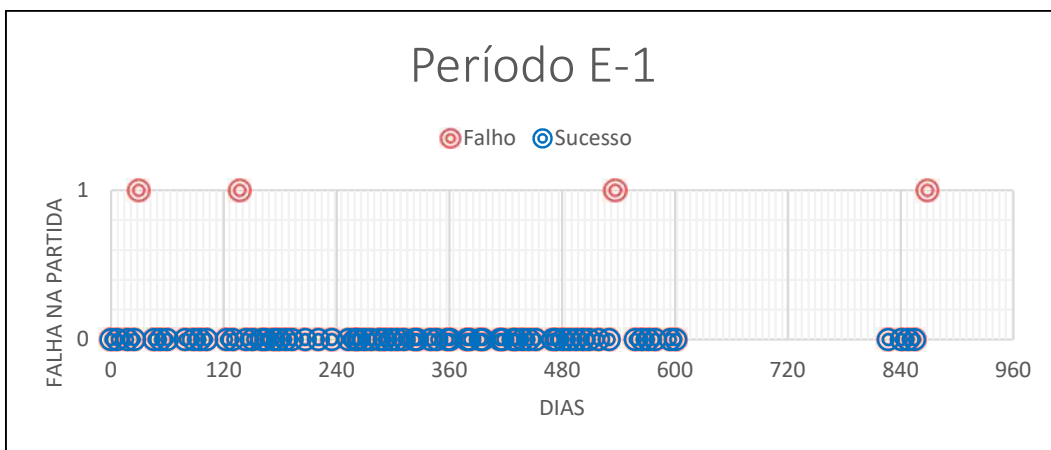


Figura 45 - Período de Testes E-1 com frequência quinzenal

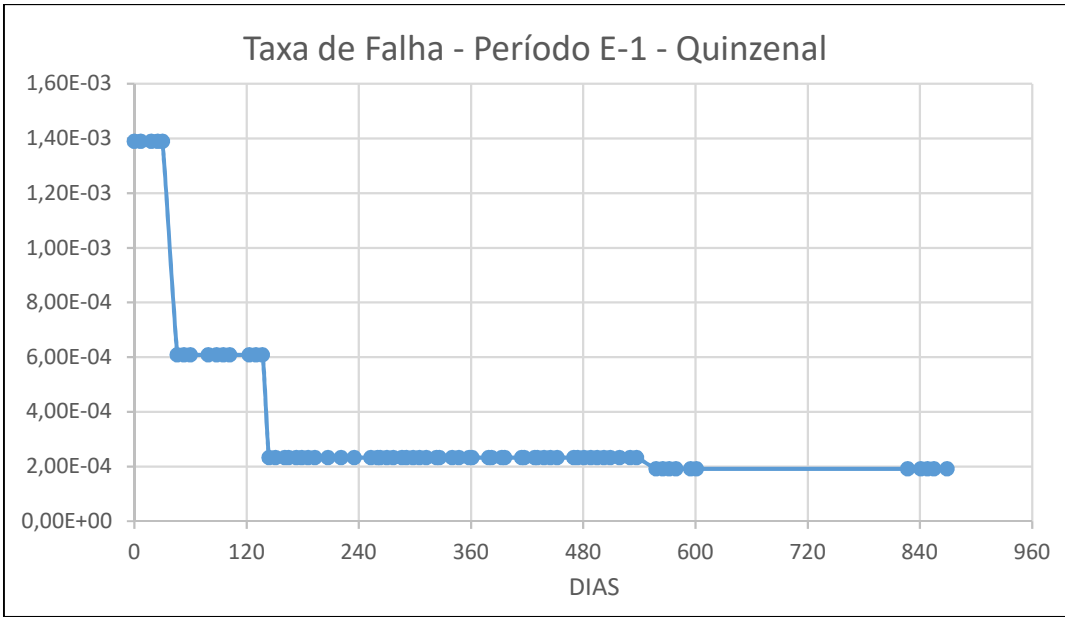


Figura 46 - Taxa de falha ao longo do período E-1

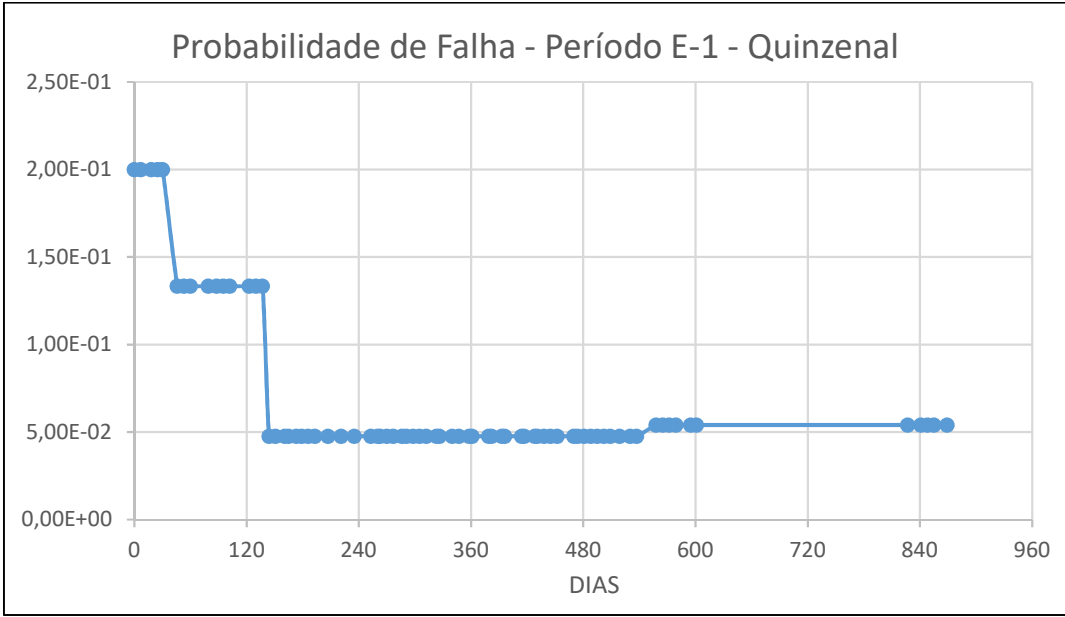


Figura 47 - Probabilidade de falha ao longo do período E-1

- E-2:

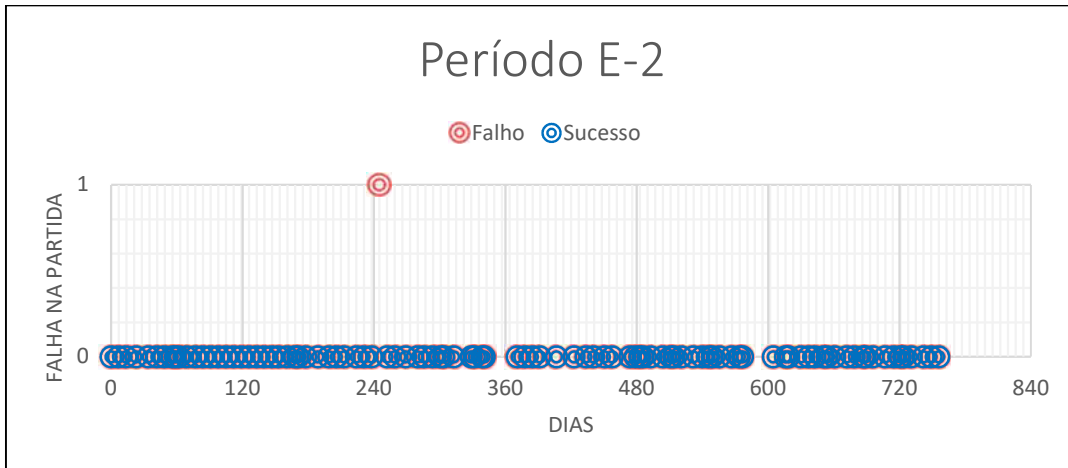


Figura 48 - Período de Testes E-2 com frequência quinzenal

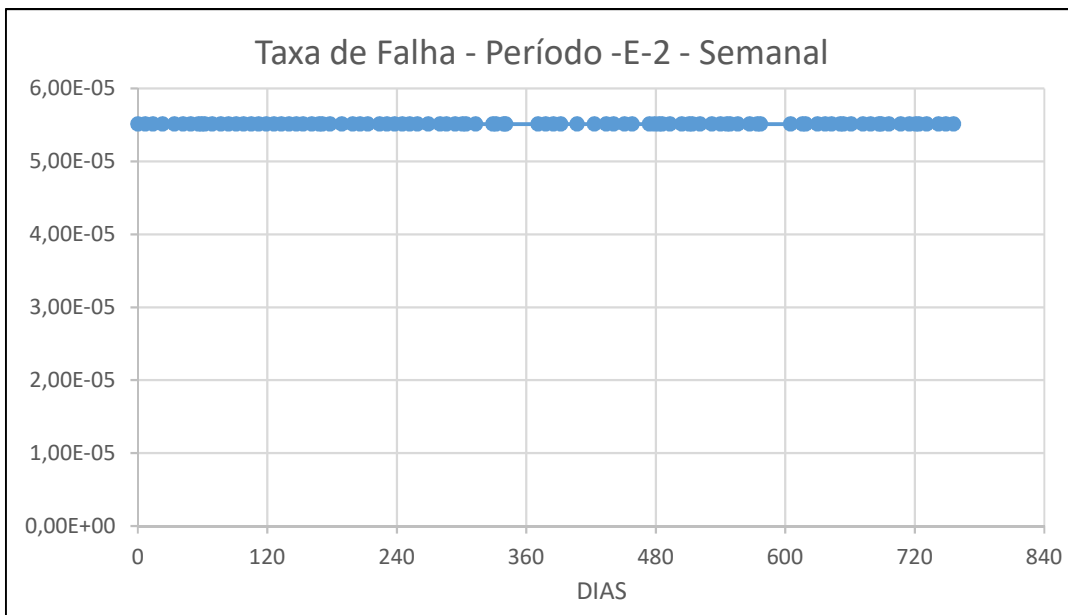


Figura 49 - Taxa de falha ao longo do período E-2

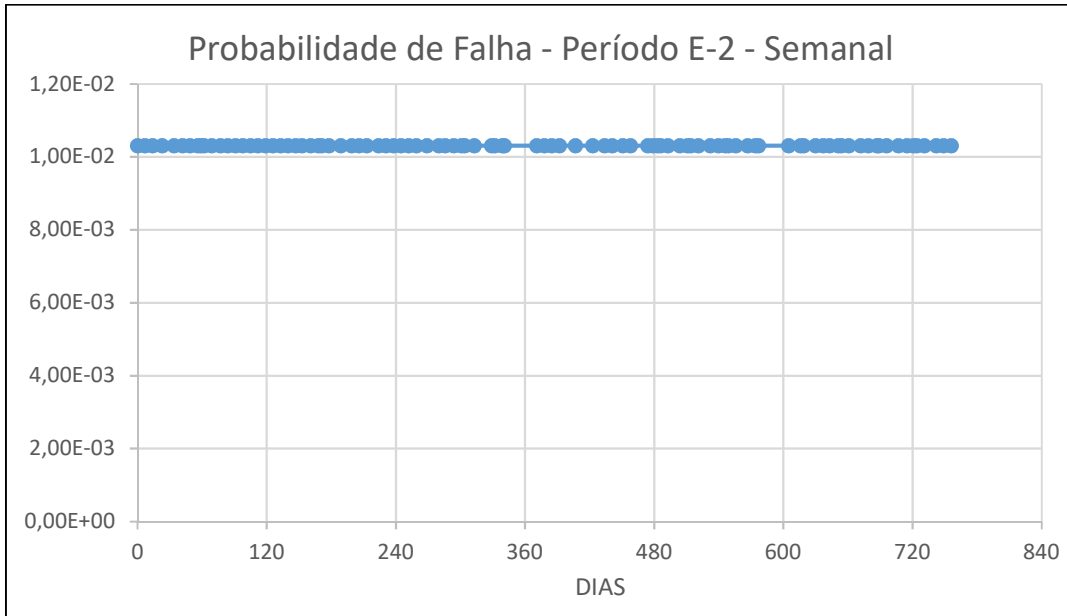


Figura 50 - Probabilidade de falha ao longo do período E-2

Apêndice C: Gráficos da taxa de falha cumulativa e Weibull dos períodos A-2 a E-2

- A-2:

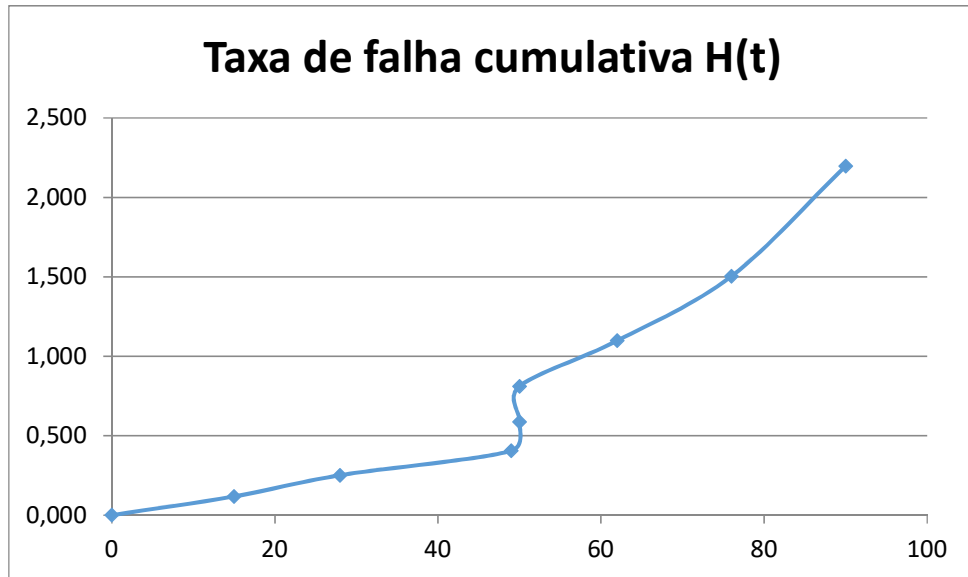
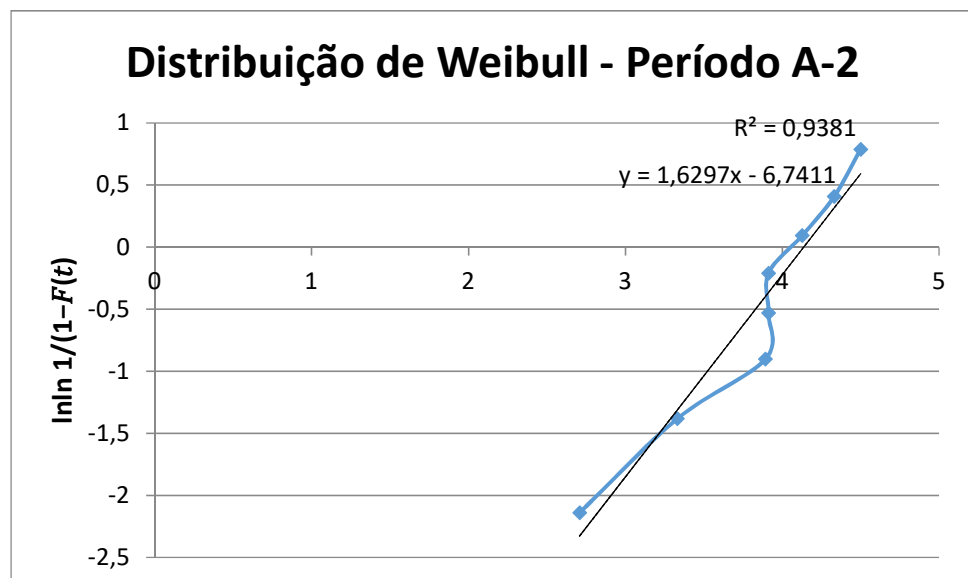


Figura 51 - Taxa de Falha cumulativa H(t) do período A-2



- A-3

Neste caso não é possível aplicar a metodologia porque não se registraram falhas e simplesmente se conclui que o comportamento é do tipo exponencial.

- B-1

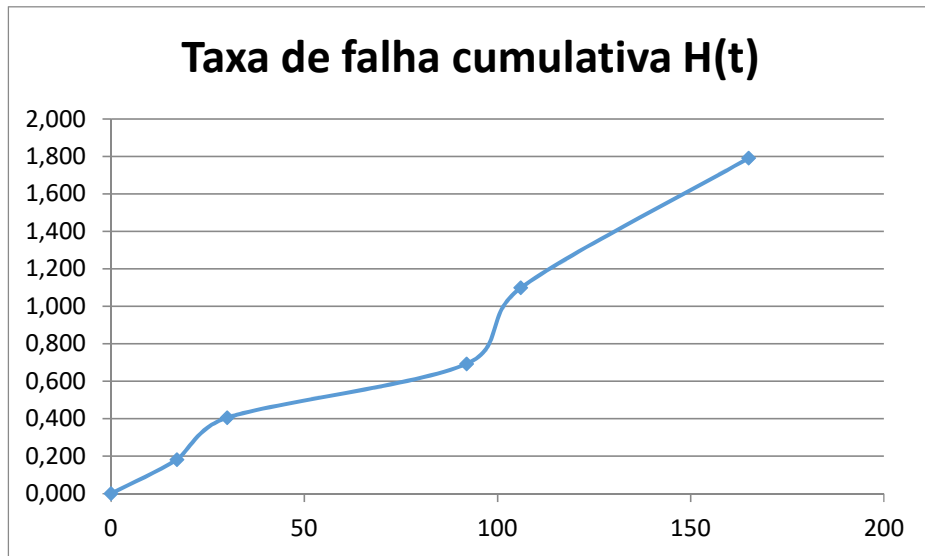
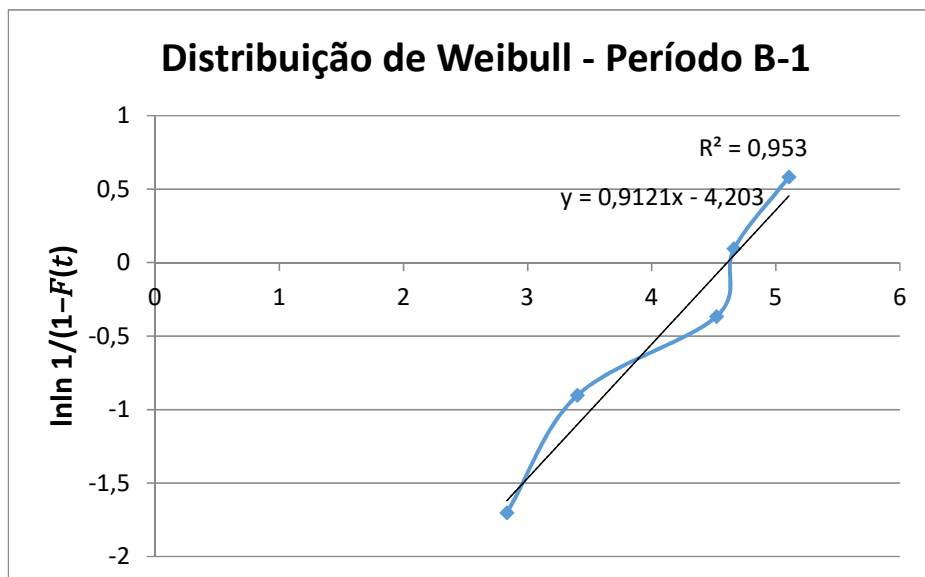


Figura 52-Taxa de Falha cumulativa H(t) do período B-1



- B-2

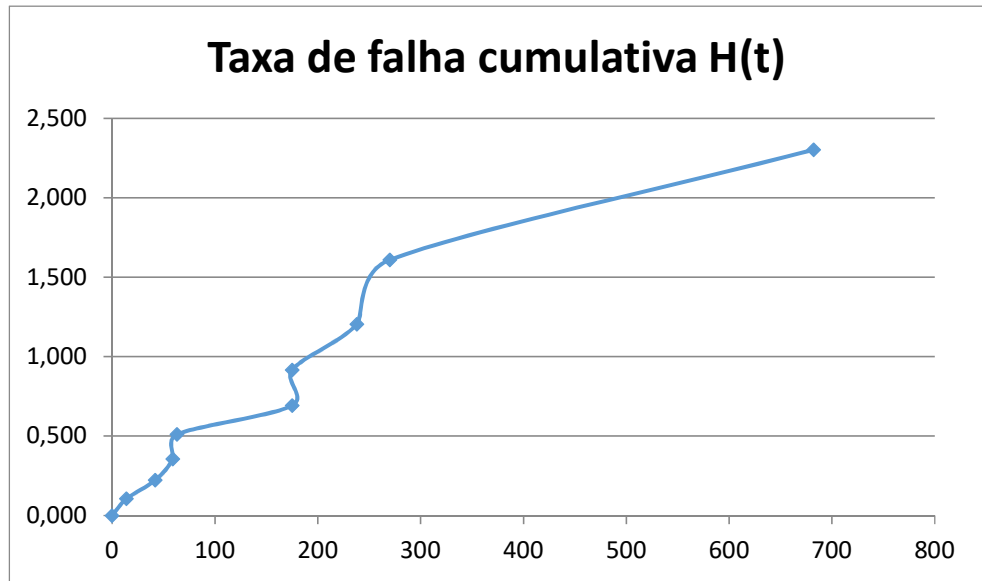
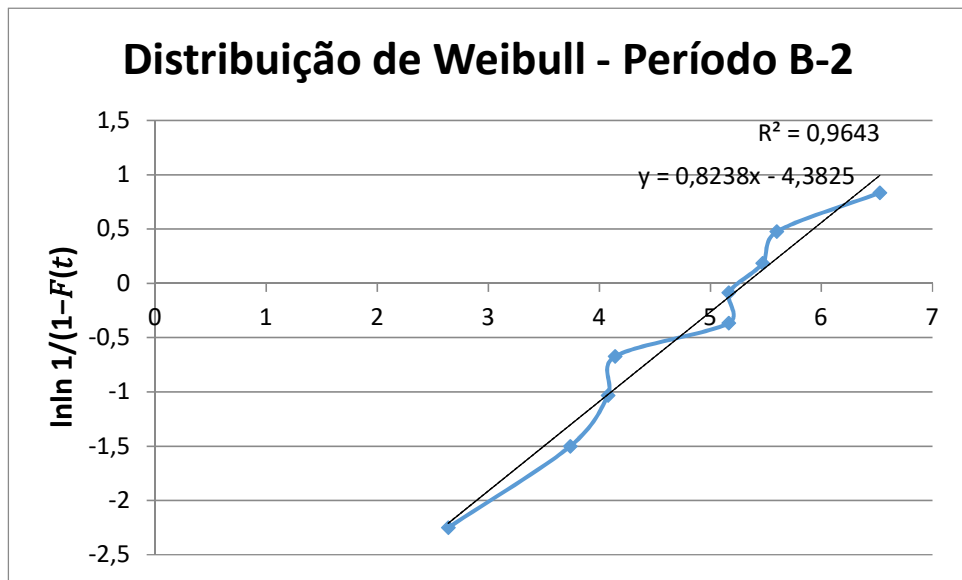


Figura 53-Taxa de Falha cumulativa H(t) do período B-2



- C-1

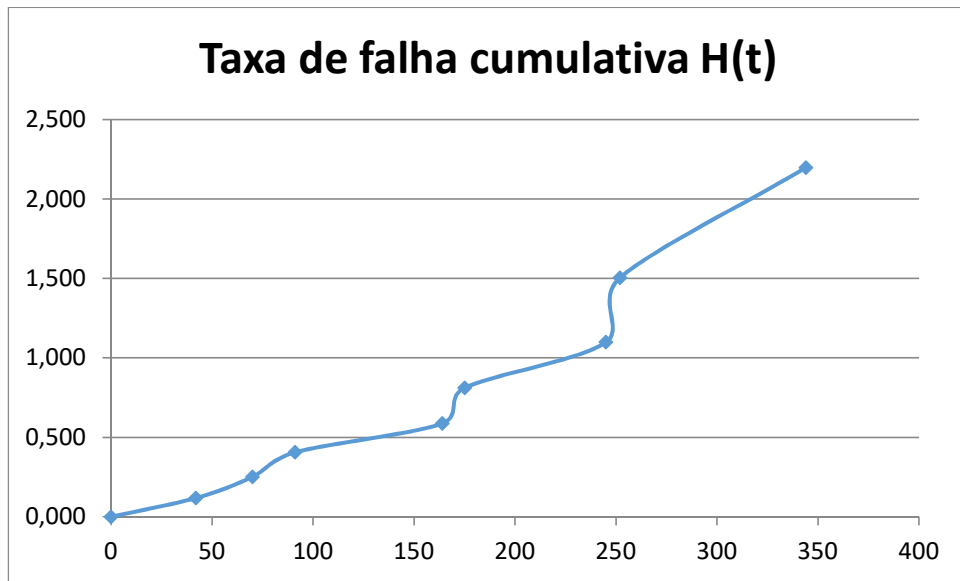
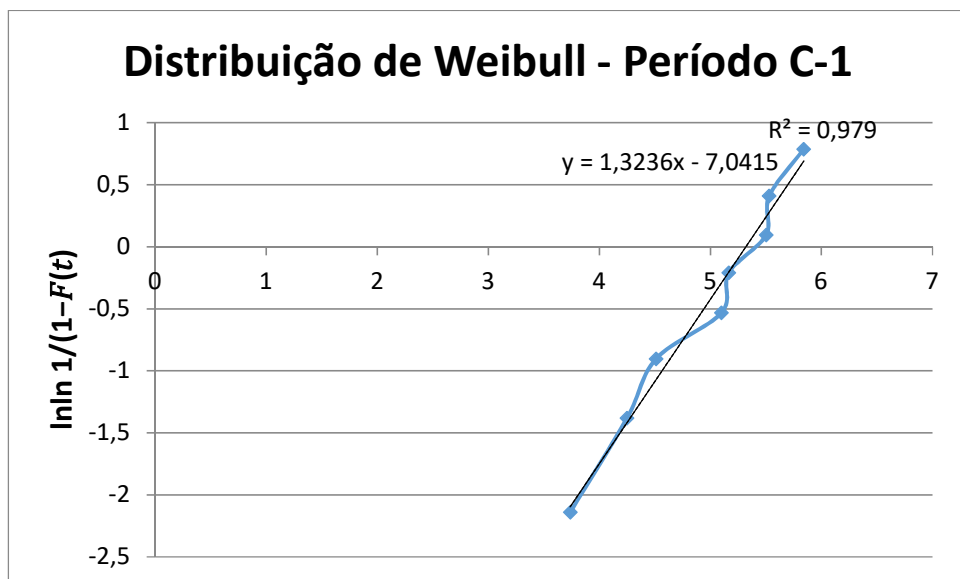


Figura 54-Taxa de Falha cumulativa H(t) do período C-1



- C-2

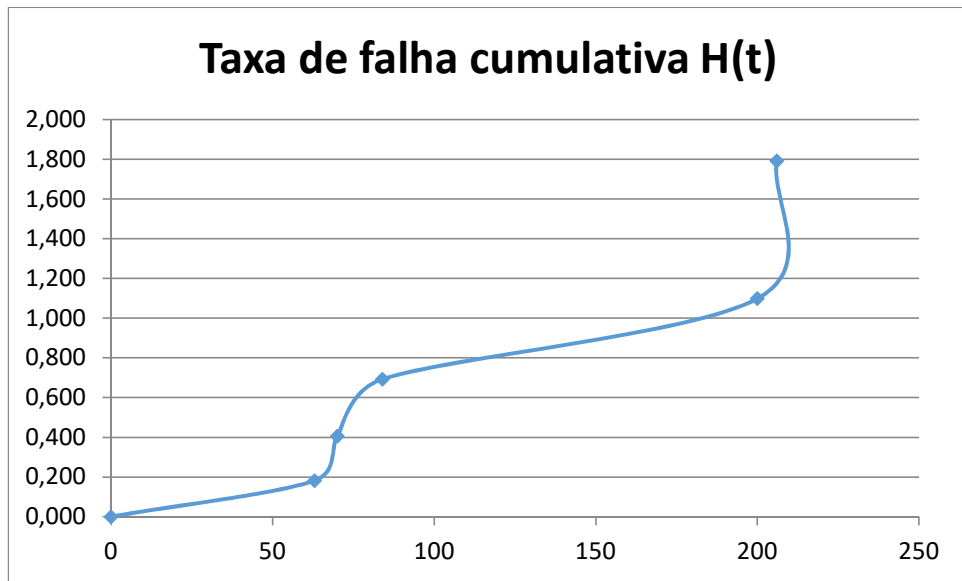
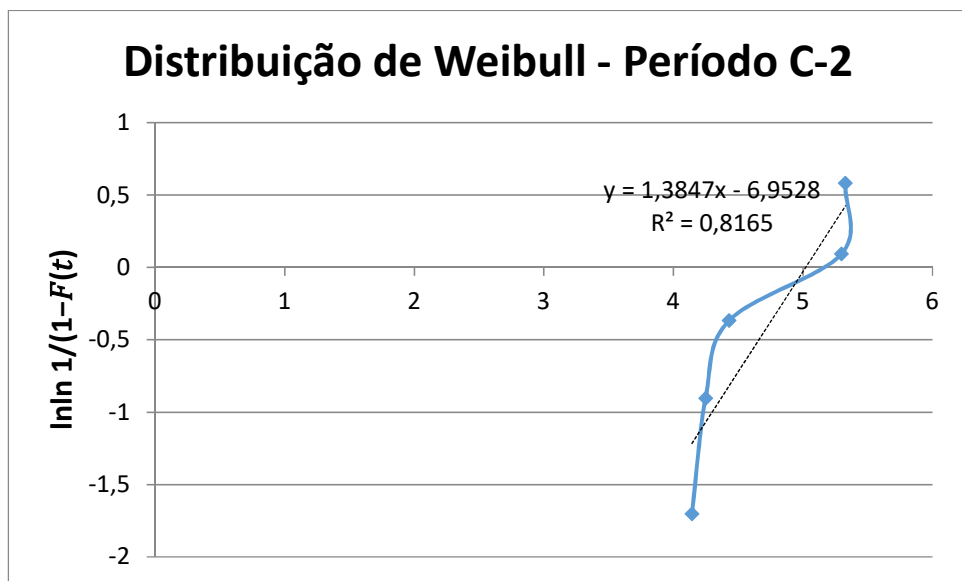


Figura 55-Taxa de Falha cumulativa H(t) do período C-2



- D-1

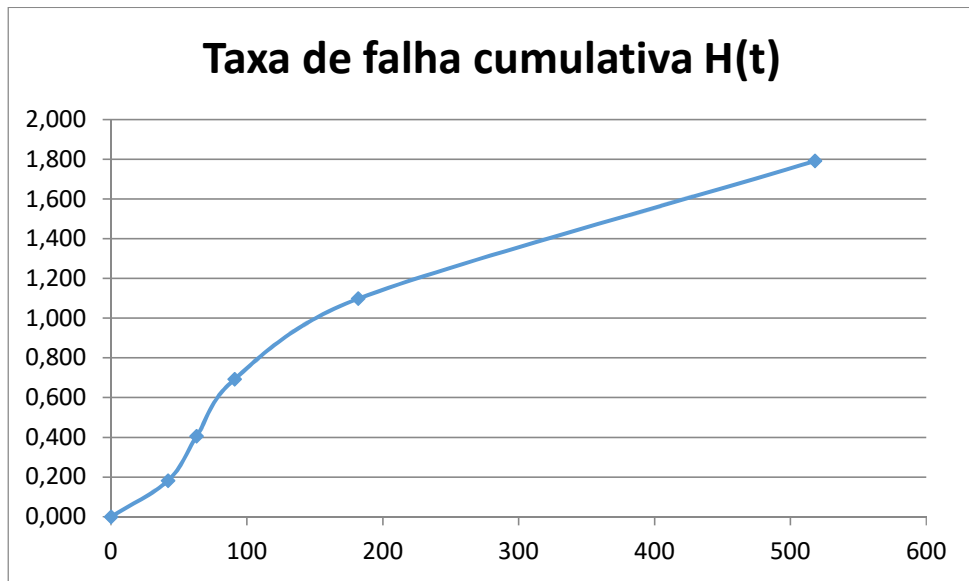
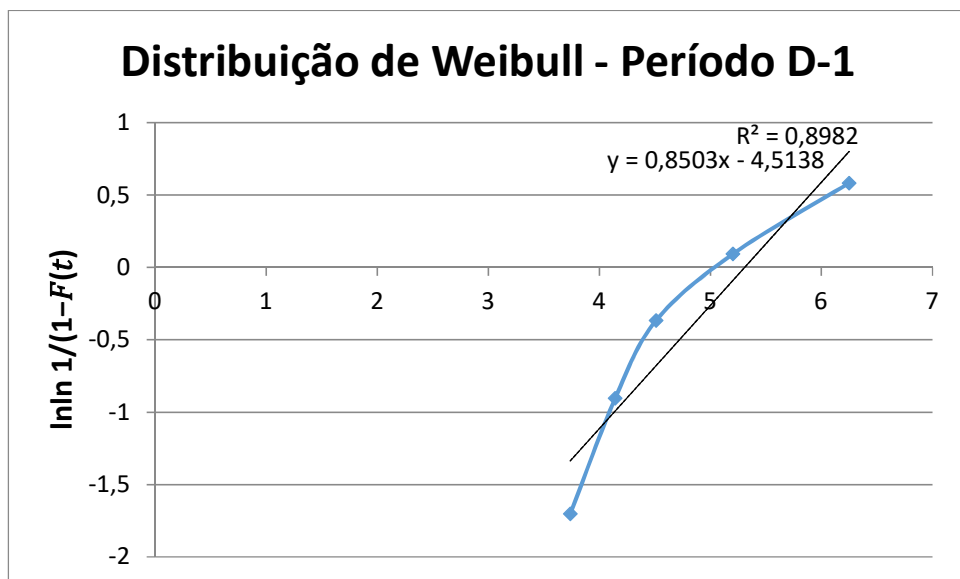


Figura 56-Taxa de Falha cumulativa H(t) do período D-1



- E-1

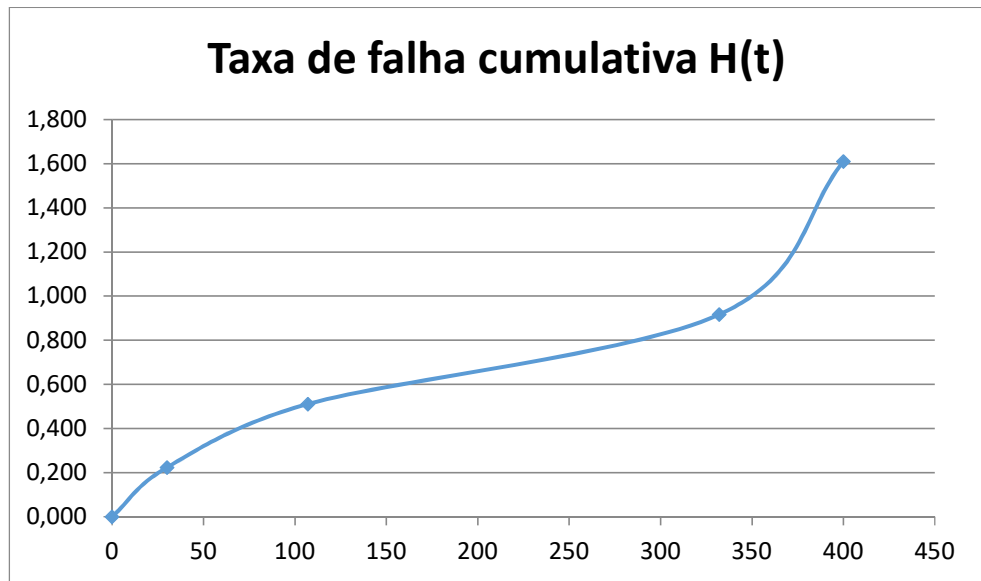
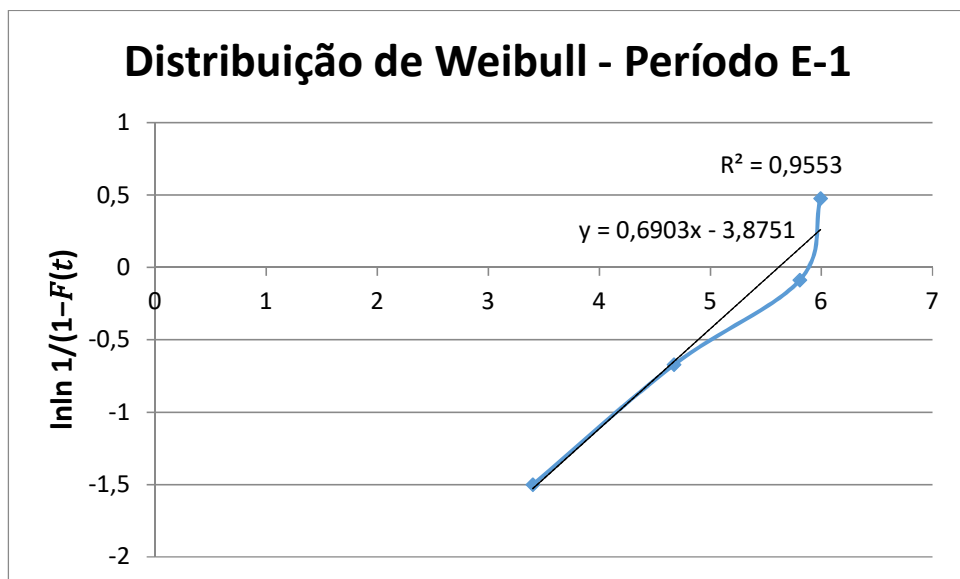


Figura 57-Taxa de Falha cumulativa H(t) do período E-1



- E-2

Neste caso não é possível aplicar a metodologia porque se registrou apenas uma falha e simplesmente se conclui que o comportamento é do tipo exponencial.