



# **Análise do Impacto do Envelhecimento de Equipamentos Críticos na Disponibilidade de Unidades Industriais**

**Guilherme Gonzalez Gonzalez de Castro**

**Projeto Final em Engenharia Química**

**Orientadores**

**Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.**

**Tobias Vieira Alvarenga, M.Sc.**

**Setembro de 2013**

# **ANÁLISE DO IMPACTO DO ENVELHECIMENTO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS NA DISPONIBILIDADE DE UNIDADES INDUSTRIAIS**

*Guilherme Gonzalez Gonzalez de Castro*

Projeto Final em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Carlos Tadeu Padilha Vieira, M.Sc.

---

Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

---

Príamo Albuquerque Melo Junior, D.Sc.

Orientado por:

---

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

---

Tobias Vieira Alvarenga, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Setembro de 2013

Castro, Guilherme Gonzalez Gonzalez de.

Análise do Impacto do Envelhecimento de Equipamentos Críticos na Disponibilidade de Unidades Industriais/ Guilherme Gonzalez Gonzalez de Castro. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013

Orientadores: Carlos André Vaz Junior e Tobias Vieira Alvarenga

Confiabilidade. 2. Envelhecimento. 3. Life Extension. 4. Projeto Final de Curso (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior Tobias Vieira Alvarenga. I. Análise do Impacto do Envelhecimento de Equipamentos Críticos na Disponibilidade de Unidades Industriais.

Aos meus pais, Antonio e Daisy, meus avós, meu irmão Rodrigo e a minha amada Carina, pelo amor e suporte que sempre me concederam. Pessoas que amo e sempre me apoiaram e incentivaram.

*"Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow.  
The important thing is to not stop questioning."*  
Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Antonio e Daisy, pelo amor, dedicação e incentivo aos estudos. Tudo que sou é devido aos seus ensinamentos.

Aos meus avós, que sempre foram exemplos de caráter e amor. Com eles aprendi que nenhum sonho é grande demais que não possa ser realizado através de trabalho e dedicação.

Ao meu irmão Rodrigo, pelo carinho e amizade que sempre tivemos.

À minha amada Carina, pelo carinho, apoio e amor durante toda a graduação. É em sua dedicação, inteligência e competência que me espelho para crescer pessoal e profissionalmente.

Aos amigos, pela compreensão e paciência nos momentos em que estive ausente devido às obrigações com as disciplinas e projeto final.

Aos meus orientadores, Carlos André e Tobias Alvarenga, por acreditarem na minha proposta e me auxiliarem na realização deste trabalho.

À DNV e os amigos que lá fiz, essenciais no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **ANÁLISE DO IMPACTO DO ENVELHECIMENTO DE EQUIPAMENTOS CRÍTICOS NA DISPONIBILIDADE DE UNIDADES INDUSTRIAIS**

Guilherme Gonzalez Gonzalez de Castro

Setembro, 2013

Orientadores: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.  
Tobias Vieira Alvarenga, M.Sc.

A perda de desempenho de unidades industriais devido ao envelhecimento de equipamentos é um fato conhecido e vem se tornando motivo de esforços crescentes de profissionais envolvidos na operação, manutenção e gerência desses ativos em busca de soluções custo-eficientes. Isso se deve ao fato dos custos de manutenção e paradas de produção se tornarem cada vez maiores, fazendo com que a margem de lucro se reduza significativamente com o tempo. Este trabalho objetiva estudar o efeito do envelhecimento de equipamentos comuns em unidades industriais na eficiência produtiva da mesma, através de análise de RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) realizada por simulações de eventos discretos no *software* MAROS. Para tal, primeiramente foi definido um modelo (baseado em diagrama de blocos), contemplando um sistema de ar de instrumento geral, uma vez que o mesmo está presente na maior parte das unidades industriais. O histórico de falhas de uma unidade industrial foi obtido e o mesmo foi tratado, tornando viável o cálculo dos parâmetros das distribuições exponencial e de Weibull para as falhas, bem como a distribuição de tempos de reparo das mesmas. Então, o modelo criado foi populado com esses parâmetros e diferentes tempos de vida foram simulados. Por fim, os resultados dessas simulações foram avaliados e comparados, visando verificar o impacto da extensão de vida útil sobre diversos indicadores de performance da unidade e as diferenças obtidas nesses indicadores oriundas da utilização das distribuições exponencial e de Weibull.

**Palavras-chave:** Confiabilidade, Envelhecimento, *Life Extension*, RAM, Eventos Discretos, Distribuição de Weibull, Sistema de Ar de Instrumentos

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer.

## **ANALYSIS OF CRITICAL EQUIPMENT AGING AND ITS IMPACT ON AVAILABILITY OF INDUSTRIAL UNITS**

Guilherme Gonzalez Gonzalez de Castro

September, 2013

Supervisors: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.  
Tobias Vieira Alvarenga, M.Sc.

Performance loss of industrial assets due to equipment aging is a well known fact and has been subject of increasing effort for operation, maintenance and management to pursue cost efficient solutions. This is due to increasing maintenance costs and production downtime, which represents relevant decrease in operating margin with time. This essay aims to study the equipment aging effects in industrial plants efficiency employing RAM (Reliability, Availability and Maintainability) analysis based on event-oriented discrete events simulation software named MAROS. To perform the simulations, a model (reliability block diagram based) was created to represent an instrument air system and failure data from real facilities was compiled for exponential and Weibull distributions parameters estimation. Besides, time-to-repair data was treated to represent a CDF distribution for each equipment category. Thus, the base simulation model was populated with these parameters for different lifetime cycles. Finally, the results were extracted, analysed and compared, in order to verify the impact of life extension in performance indexes of the industrial plant and the differences identified for exponential and Weibull parameters populated models.

**Key-words: Reliability, Aging, Life Extension, RAM, Discrete Events, Weibull Distribution, Instrument Air System**



# ÍNDICE

1.	Introdução	1
2.	Conceitos Básicos em Engenharia de Confiabilidade	3
3.	Ciclo de Vida, Envelhecimento e Extensão de Vida Útil de Unidades Industriais	9
4.	Dados de Falha e Reparo para Confiabilidade	15
5.	Conceitos em Estatística	17
5.1.	Definições Básicas	17
5.2.	Distribuições de Tempo de Vida – Modelos Contínuos	19
5.2.1.	Distribuição Exponencial	19
5.2.2.	Distribuição de Weibull – Modelo a Dois Parâmetros	21
5.3.	Métodos para Estimativa dos Parâmetros de Distribuições Estatísticas	23
5.3.1.	Métodos Gráficos	24
5.3.1.1.	Gráfico de Probabilidade de Weibull	24
5.3.1.2.	Gráfico da Função Hazard	25
5.3.2.	Métodos Analíticos	26
5.3.2.1.	Estimador de Máxima Verossimilhança – Maximum Likelihood Estimator (MLE)	26
5.3.2.2.	Método dos Momentos (MOM – <i>Method Of Moments</i> )	28
5.3.2.3.	Método dos Mínimos Quadrados (Least Squares Method - LSM)	29
6.	Simulação de Eventos Discretos e o Método de Monte Carlo	31
6.1.	Modelos de Simulação	31
6.2.	Sistemas de Eventos Discretos	32
6.2.1.	Simulação de Eventos Discretos Orientada a Evento	34
7.	Sistemas de Suprimento de Ar de Instrumentos	38
8.	Metodologia	41
8.1.	Modelo e Casos de Simulação	41
8.2.	Tratamento Estatístico de Falhas	43
8.2.1.	Determinação dos Tempos de Reparo	44
8.2.2.	Determinação dos Parâmetros das Distribuições	52
8.2.2.1.	Determinação da Taxa de Falha ( $\lambda$ ) da Distribuição Exponencial	52
8.2.2.2.	Determinação dos Parâmetros da Distribuição de Weibull	53
9.	Resultados e Discussão	61
9.1.	Casos de Distribuição Exponencial	61
9.2.	Casos de Distribuição de Weibull	68
9.2.1.	Método da Média	68
9.2.2.	Método da Mediana	73

9.2.3. Método da CDF	78
9.3. Análise Comparativa: Resultados Utilizando Distribuição Exponencial vs. Weibull	82
10. Conclusões	86
Referências Bibliográficas	88

# 1. Introdução

A perda de desempenho de unidades industriais devido ao envelhecimento de equipamentos é um fato conhecido e vem se tornando motivo de esforços crescentes de profissionais envolvidos na operação, manutenção e gerência desses ativos em busca de soluções custo-eficientes. Isso se deve ao fato dos custos de manutenção e perdas de produção se tornarem cada vez maiores, fazendo com que a margem de lucro se reduza significativamente com o tempo. Nesse ponto surge a discussão sobre dois caminhos a serem seguidos: a extensão da vida útil dos equipamentos, mediante melhorias e menores investimentos, porém com significativa incerteza de ganho de performance; ou a substituição do mesmo, que consome tempo e requer maiores investimentos.

Apesar disso, nem sempre é simples a correlação entre o envelhecimento do equipamento e a perda de performance das unidades industriais. Dessa forma, demanda-se um estudo mais aprofundado dos registros de falhas e reparo de equipamentos, de modo a permitir construir essa correlação através de métodos estatísticos apropriados. Esse estudo isoladamente, no entanto, apresenta resultados limitados, ou seja, informa uma tendência de envelhecimento e não resultados quantitativos da perda de eficiência da unidade com o tempo. Dessa forma, é necessário lançar mão de técnicas de simulação da confiabilidade desses ativos, visando subsidiar tomadas de decisão de investimentos e priorização baseadas no ganho em eficiência produtiva que as mesmas apresentam. Nesse contexto, surgem as análises de RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) utilizando simulações de eventos discretos como solução para prover informações fundamentais para uma estimativa mais assertiva da condição atual ou futura da unidade.

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito do envelhecimento de equipamentos comuns em unidades industriais na eficiência produtiva e número de falhas da mesma, através de análise de RAM realizada por simulações de eventos discretos (orientadas a evento) no *software* MAROS. Para tal, foi escolhido um sistema comum em unidades industriais, o Sistema de Ar de Instrumentos, e avaliado o comportamento da eficiência produtiva utilizando dados de falha gerais

tratados segundo distribuições exponencial, i.e. taxa de falha constante com o tempo; e de Weibull, que considera taxa variável com o tempo, para diversos tempos de vida.

Este trabalho está organizado em 11 capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução da motivação, objetivos e pontos abordados no texto. Os Capítulos 2 a 7 apresentam o embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho e abordam conceitos básicos em engenharia de confiabilidade, envelhecimento e extensão de vida útil de unidades industriais, qualidade de dados de falha e reparo no contexto de estudos de confiabilidade, além de conceitos de estatística, simulações de eventos discretos e projeto de sistemas de ar de instrumento. O Capítulo 8 apresenta a metodologia utilizada para a condução do estudo de caso cujos resultados e discussões estão apresentados no Capítulo 9. Por fim, o Capítulo 10 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## 2. Conceitos Básicos em Engenharia de Confiabilidade

Cabe dedicar especial atenção às definições básicas de engenharia de confiabilidade, uma vez que o trabalho adentra este campo vasto, porém ainda pouco explorado e conhecido nas indústrias de processo. Dessa forma, primeiramente deve-se definir do que se trata confiabilidade e engenharia de confiabilidade:

- **Engenharia de Confiabilidade** (IEEE, 1990) – é um campo de engenharia que lida com o estudo, análise e gerenciamento do ciclo de vida de confiabilidade.
- **Confiabilidade  $R(t_1, t_2)$**  (NBR 5462, 1994) – Probabilidade de um item poder desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo  $[t_1, t_2]$ .

No contexto deste trabalho, é importante destacar as definições de alguns conceitos utilizados em confiabilidade e manutenibilidade que, por vezes, são utilizados coloquialmente de maneira equivocada (NBR 5462, 1994):

- **Defeito** – Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos. Os requisitos podem, ou não, ser expressos na forma de uma especificação e um defeito pode, ou não, afetar a capacidade de um item desempenhar uma função requerida.
- **Falha** – Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Após a falha, o item apresenta uma pane, sendo a falha um evento diferentemente da pane, que é um estado.
- **Pane** – Estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos.

Dessa forma, o tratamento de dados realizado neste trabalho engloba somente os dados de falha, uma vez que os registros foram efetuados baseados na percepção da falta de capacidade de algum item executar sua função. Assim, defeitos não estão no escopo deste trabalho, uma vez que podem, ou não, afetar a capacidade de um item desempenhar sua função requerida e, portanto, podem não ser detectáveis durante a operação da planta.

Tão importante quanto o conceito de confiabilidade, e raramente tratada separadamente do mesmo, é a manutenibilidade, que consiste na capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos (NBR 5462, 1994). Neste contexto, inserem-se (NBR 5462, 1994):

- **Manutenção** – 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.
- **Filosofia de manutenção** – Um conjunto de princípios para a organização e execução da manutenção.
- **Política de manutenção** – Descrição das inter-relações entre os escalões de manutenção, os níveis de intervenção e os níveis de manutenção a serem aplicados para a manutenção de um item.

Ou seja, manutenção é um conjunto de ações técnicas e gerenciais e deve possuir filosofia e política bem definidas. Assim, surgem três diferentes abordagens de manutenção (NBR 5462, 1994):

- **Manutenção preventiva** – Manutenção efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.
- **Manutenção corretiva** – Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.
- **Manutenção controlada/Manutenção preditiva** – Manutenção que garante uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Pela definição acima, conclui-se que a manutenção corretiva é de extrema importância na indústria e uma das responsáveis diretas pela disponibilidade de plantas industriais, já que quanto maior o tempo pelo qual equipamentos ficarem

parados menor é a disponibilidade. Dessa forma, é necessário definir alguns conceitos relacionados a manutenções corretivas (NBR 5462, 1994):

- **Reparo** – parte da manutenção corretiva na qual são efetuadas as ações de manutenção efetiva sobre o item, excluindo-se os atrasos técnicos.
- **Restabelecimento funcional** – Recuperação da capacidade de um item desempenhar uma função requerida depois de uma pane.
- **Atraso logístico** – Tempo acumulado durante o qual uma ação de manutenção não pode ser executada devido à necessidade de se obterem os recursos necessários, excluindo-se qualquer atraso administrativo. Atrasos logísticos podem ser devido a viagens, espera por peças de reposição, tempo de mobilização e disponibilidade de especialistas, condições meteorológicas adversas, etc.
- **Tempo de reparo** – Parte do tempo de manutenção corretiva durante a qual são executadas as ações de reparo em um item.

Conforme definidos acima, conclui-se que o tempo de restabelecimento funcional é a soma do atraso logístico com o tempo de reparo efetivo.

No que tange as falhas em unidades industriais, definem-se (NBR 5462, 1994):

- **Tempo de operação** – Intervalo de tempo durante o qual um item está em estado de operação, ou seja, é o tempo total de observação do funcionamento do mesmo.
- **Tempo até falha** – Duração acumulada dos tempos de operação de um item desde sua colocação em estado de disponibilidade até a ocorrência da falha ou do instante do restabelecimento funcional até a ocorrência da próxima falha.

É necessário, então, definir o conceito de taxa de falha como medida de confiabilidade (NBR 5462, 1994):

- **Taxa de falha instantânea  $\lambda(t)$**  – Limite, se existir, da razão da probabilidade condicional de que o tempo T de falha de um item ocorra em um dado intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t]$ , visto que o item estava disponível no instante t pela duração  $\Delta t$  deste intervalo, quando  $\Delta t$  tende a zero:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[t < T < (t + \Delta t) \mid T > t]}{\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} * \frac{1}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1)$$

Em que:

$t$  = variável aleatória de interesse: tempo até a primeira falha, tempo entre a falha de um item reparado ou tempo até a falha de um item não-reparado.

$F(t)$  = função de distribuição acumulada de probabilidade de falha para o instante  $t$

$R(t)$  = função de confiabilidade para o instante  $t$

$f(t)$  = função de densidade de probabilidade de falha para o instante  $t$ .

Dessa forma, a taxa de falha média  $\bar{\lambda}(t_1, t_2)$  é a média da taxa de falha instantânea em um dado intervalo de tempo  $[t_1, t_2]$ , sendo relacionada com a taxa de falha instantânea pela equação (2):

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (2)$$

Por sua vez, define-se outro conceito em engenharia de confiabilidade, disponibilidade, que envolve a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

- **Disponibilidade instantânea  $A(t)$**  – Probabilidade de um item ser capaz de desempenhar uma função requerida sob dadas condições, em um dado instante, supondo-se que os recursos externos tenham sido providos.

Dessa forma, a Disponibilidade média  $\bar{A}(t_1, t_2)$  é a medida da disponibilidade instantânea durante um dado intervalo de tempo, ou seja:

$$\bar{A}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (3)$$



Por fim, a seguir definem-se alguns conceitos que estão relacionados à medição da confiabilidade (NBR 5462, 1994):

- **Intensidade de falha instantânea  $z(t)$**  – Limite, se existir, da razão do número médio de falhas de um item reparado em um intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t]$ , pela duração do intervalo  $t$  quando esta duração tende a zero, ou seja:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E[N(t + \Delta t) - N(t)]}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde:

$N(t) \equiv$  número de falhas no intervalo  $[0, t]$

$E \equiv$  esperança matemática.

- **Intensidade de falha média  $\bar{z}(t_1, t_2)$**  – Média da intensidade de falha instantânea em um dado intervalo de tempo  $[t_1, t_2]$ , sendo relacionada com a intensidade de falha instantânea pela equação (5):

$$\bar{z}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} z(t) dt \quad (5)$$

- **Tempo médio até falha (MTTF – *Mean Time to Failure*)** – Esperança matemática do tempo até a falha de um item.
- **Tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failure*)** – Esperança matemática do tempo entre falhas de um item.
- **Mantenabilidade** – Probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos.
- **Taxa de reparo instantânea  $\mu(t)$**  – Limite, se existir, da razão da probabilidade condicional de que o instante  $T$  de término de uma ação de manutenção corretiva ocorra em um dado intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t]$ , pela duração  $\Delta t$  deste intervalo, quando  $\Delta t$  tende a zero, supondo-se que a ação esteja em andamento no início do intervalo de tempo, ou seja:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[t < T < (t + \Delta t) \mid T > t]}{\Delta t} \quad (6)$$

- **Taxa de reparo média  $\bar{\mu}(t_1, t_2)$**  – Média da taxa de reparo instantânea em um dado intervalo de tempo  $[t_1, t_2]$ , sendo relacionada com a taxa de reparo instantânea pela equação 7:

$$\bar{\mu}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \mu(t) dt \quad (7)$$

- **Tempo de restabelecimento médio (MTTR – *Mean Time to Repair*)** – Esperança matemática do tempo de restabelecimento.

### 3. Ciclo de Vida, Envelhecimento e Extensão de Vida Útil de Unidades Industriais

É sabido que, assim como organismos vivos, unidades industriais possuem um ciclo de vida bem característico, fazendo com que seja muito simples estabelecer analogias entre a vida do ser humano e de plantas de processo, por exemplo. Para tal é necessária a definição de alguns termos que serão utilizados nesse trabalho (NBR 5462, 1994):

- **Vida útil** – Sob dadas condições, é o intervalo de tempo desde o instante em que um item é colocado pela primeira vez em estado de disponibilidade até o instante em que a intensidade de falha torna-se inaceitável ou até que o item seja considerado irrecuperável depois de uma pane.
- **Período de falhas prematuras** – Período na vida de um item, durante o qual a intensidade de falha instantânea para um item reparado, ou a taxa de falha instantânea para um item não-reparado, é consideravelmente maior que aquela do período subsequente.
- **Período de taxa de falha constante** – Período na vida de um item não-reparado, durante o qual a taxa de falha é aproximadamente constante.
- **Período de falhas por deterioração** – Período final da vida de um item, durante o qual a intensidade de falha instantânea para um item reparado ou não-reparado, é consideravelmente maior do que aquela do período precedente.

A “Curva da Banheira”, apresentada na Figura 1, resume de forma gráfica os períodos da vida útil dos itens e equipamentos de unidades industriais conforme definidos acima.

O envelhecimento de equipamentos de unidades industriais, foco deste trabalho, é uma questão que se faz presente no meio corporativo e acadêmico e surgiu, principalmente, nas nações em que a industrialização data de muitos anos. Dessa forma, o envelhecimento vem sendo reconhecido e estudado como um importante assunto em estudos de confiabilidade e análises de segurança com viés probabilístico para unidades industriais, de modo que agências nacionais e internacionais vêm publicando recomendações para a execução desses estudos. Apesar disso, a distinção de sistemas reparáveis e não-reparáveis, dentre outros,

ainda não é completamente conhecida, de modo a gerar erros conforme demonstrado por ASCHER e FEINGOLD (1984). Esta discussão, no entanto, ultrapassa o escopo deste trabalho e maiores detalhes podem ser obtidos em MELO *et. al* (1999).

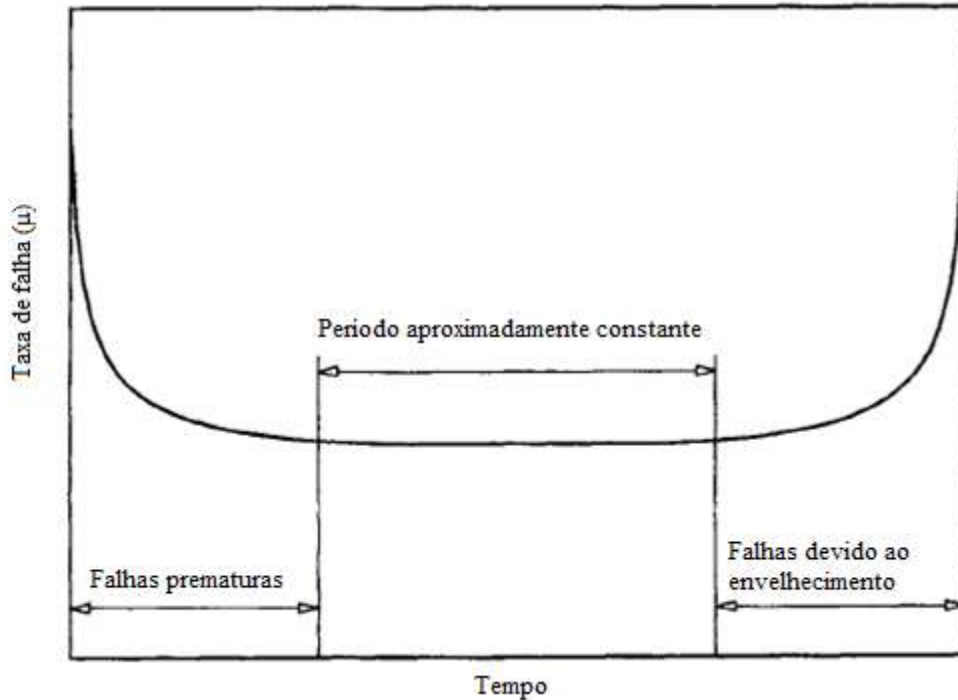


Figura 1 - Curva da Banheira (Adaptado de Crowl, 2002)

Um dos primeiros esforços de pesquisa sobre os efeitos do envelhecimento de equipamentos industriais foi conduzido pela Comissão Regulatória Nuclear Americana (U.S. Nuclear Regulatory Commission - NRC) sob a ótica de usinas nucleares no fim da década de 80, segundo MELO *et. al* (1999). O programa, intitulado Nuclear Plant Aging Research (NPAR), visava o aumento da velocidade de atuação de sistemas e componentes, vitais para as plantas nucleares e sua segurança, pelo entendimento e gerenciamento da degradação pelo envelhecimento dos mesmos. Conforme explicitado por NRC (1991), os principais objetivos do programa NPAR são “compreender o envelhecimento e identificar maneiras de gerenciá-lo quando relacionado a sistemas e componentes de segurança de plantas de energia nuclear”. Após este primeiro esforço, diversos outros foram realizados e estão descritos em MELO *et.al.* (1999), principalmente para usinas nucleares.

Uma premissa simplificadora largamente difundida é a utilização de tempos para falhar seguindo distribuições exponenciais, isto é, taxa de falha constante, geralmente válida somente para curtos intervalos de tempo. Ou seja, a situação mais

geral e frequente é de taxas de falha dependentes do tempo, devido às características naturais de componentes (OLIVEIRA *et. al.*, 2004). Além disso, equipamentos voltados para segurança em plantas industriais são mecânicos, em geral, de modo que as taxas de falha não devem ser constantes, principalmente quando considerados os tempos de operação de projeto dessas plantas, que em geral superam os 20 anos. A discussão sobre as distribuições a serem utilizadas neste trabalho está apresentada no item 5.2.

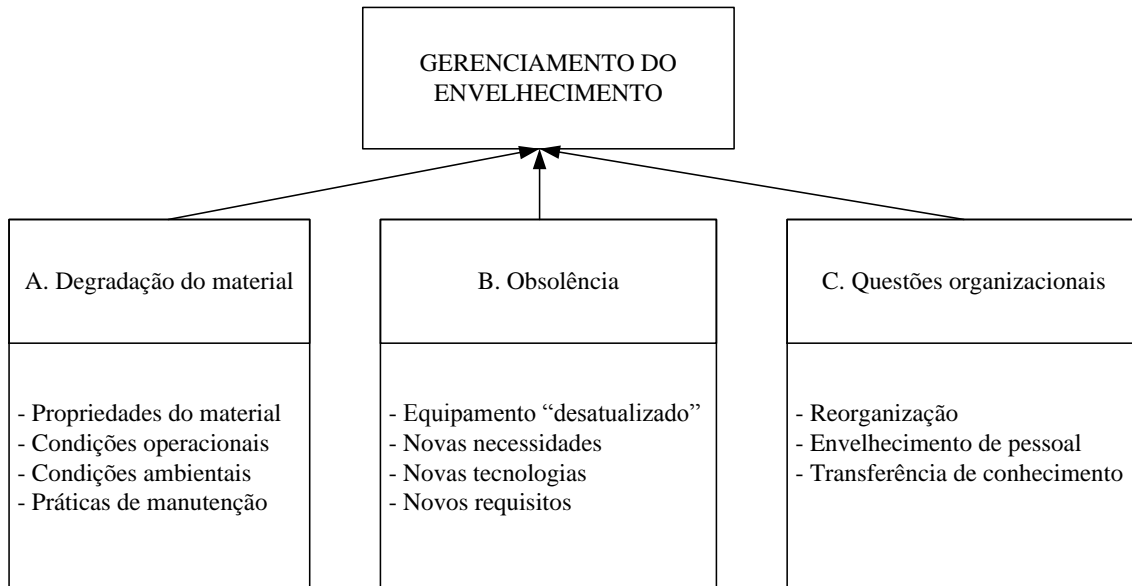
Outra premissa simplificadora muito adotada é a de reparo perfeito, ou seja, considera-se que após o reparo o equipamento se comporta como novo e se encontra no estado chamado *as good as new*. Na prática, esta aproximação é válida quando o componente falho é substituído por um novo o que, em muitas indústrias como as de refino e processamento de petróleo, petroquímica e outras indústrias pesadas, nem sempre pode ser garantido. Isso se dá pela complexidade e dimensões desses equipamentos, por exemplo, que tornam muito difícil a implementação de políticas de substituição para todos eles, tornando usual a substituição somente do componente que falhou e não de todo o equipamento (OLIVEIRA *et. al.*, 2004).

As simplificações apresentadas nos parágrafos anteriores, de forma geral, não são aplicáveis para estudos de extensão de vida útil. Estes surgiram de maneira estruturada e tiveram seu início de maneira mais intensa visando unidades *offshore* que operam no Mar do Norte, uma vez que muitas delas estão próximas ou já alcançaram o final de sua vida de projeto. Os dois fatores principais que levam à proposta de extensão de vida de unidades offshore são (HOKSTAD *et. al.*, 2010):

- **Fator técnico** – se caracteriza pela possibilidade de se produzir mais óleo do que foi projetado à época dos primeiros estudos de reservatórios, seja devido aos cálculos pouco acurados durante esses estudos ou aos avanços na área de engenharia de reservatórios desde então;
- **Fator econômico** – se caracteriza principalmente pelo alto preço do petróleo no mercado internacional, tornando a exploração de alguns poços ainda rentáveis.

Os aspectos do envelhecimento que devem ser gerenciados para o acompanhamento da unidade através de sua vida útil e também para extensão de vida estão listados abaixo e exibidos em maiores detalhes na Figura 2.

- Degradação material;
- Obsolescência, tanto operacional quanto tecnológica;
- Questões organizacionais.



**Figura 2 - Gerenciamento do Envelhecimento de Unidades Industriais (HOKSTAD *et. al.*, 2010)**

HOKSTAD *et. al* (2010) sugere que o processo de *life extension* consista de 6 passos principais listados abaixo e demonstrados de maneira gráfica na Figura 3:

- Coleta de dados e informações relevantes para identificação e análise de fatores de risco além de medidas requeridas de redução de risco, incluindo o estabelecimento de critérios de risco aceitáveis.
- Avaliação preliminar de sistemas, estruturas e componentes (SEC) críticos para identificação de unidades e barreiras críticas com respeito à consequência e probabilidade de falha. Os aspectos relacionados às particularidades operacionais ou de design da unidade como redundâncias, falhas de causa comum, detectabilidade de falhas e disponibilidade do sistema também devem ser considerados.
- Análise de falhas e desafios com respeito à degradação material devem ser feitos de maneira mais aprofundada considerando:
  - Disponibilidade para inspeção/monitoramento dos SEC a fim de se conhecer seu estado;
  - Acessibilidade para manutenção e/ou modificações do SEC.

Além disso, considerando obsolescência da unidade e questões organizacionais, é necessária a identificação de desafios e gargalos em relação aos requisitos atuais:

- Identificação e avaliação de potenciais medidas de redução de riscos.
- Avaliação do cenário geral de risco baseado em todos os aspectos de envelhecimento, dadas as medidas de redução de risco.

Caso o cenário geral de risco seja aceitável, um plano de gerenciamento de extensão de vida deve ser implementado de modo a garantir a integridade do ativo durante o período de extensão de vida proposto e:

- Certificar que o nível de integridade técnica, operacional e organizacional da unidade sejam mantidos durante o *life extension*;
- Esteja ajustado ao tipo de operação, organização e requerimentos atuais e projetados para o futuro.

Caso o risco geral não seja aceitável segundo os critérios estabelecidos, medidas adicionais de redução de risco devem ser identificadas/propostas e um novo plano de manutenção preparado.

Cabe ressaltar, por fim, que a boa gestão de integridade de ativos durante todo o ciclo de vida aumenta a probabilidade da extensão de vida do mesmo, fornecendo dados valiosos para esta tomada de decisão. Dessa forma, é imperativa a aplicação de boas-práticas de gestão de ativos, conforme preconizado na PAS 55:2008 (AIM, BSI, 2008).

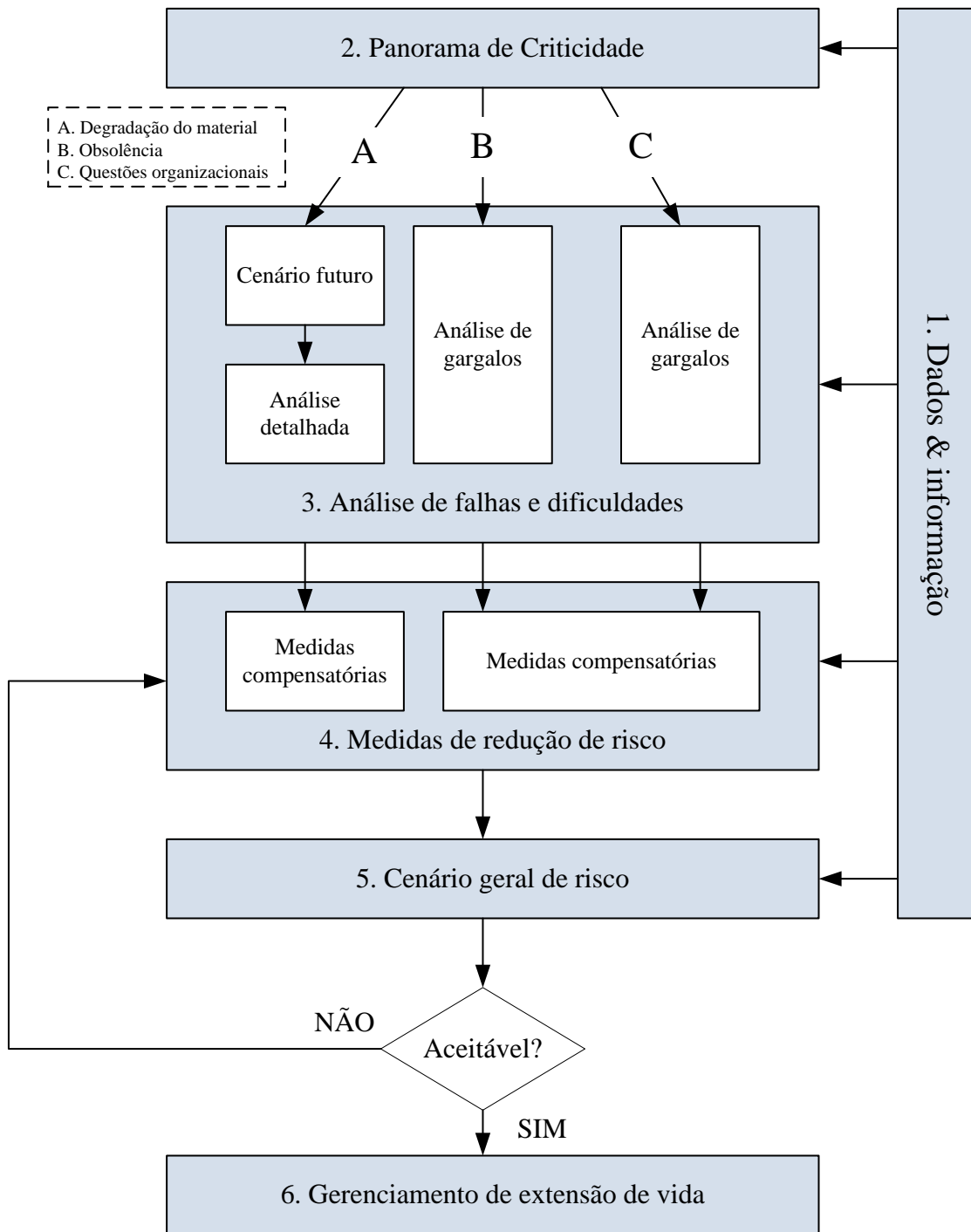


Figura 3 - Gerenciamento de Extensão de Vida Útil de Unidades Industriais (HOKSTAD *et. al.*, 2010)



## 4. Dados de Falha e Reparo para Confiabilidade

A aquisição de dados de confiabilidade para análises de RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) pode ser uma etapa limitante do estudo uma vez que, na maioria das vezes, não há uma maneira formal padronizada do registro de falhas e manutenção nas instalações industriais. Há, basicamente, dois tipos de dados de confiabilidade das unidades (ESREDA, 1999):

- **Registros de falha** – É um conjunto de informações sobre a falha de um componente ou equipamento. Estes registros formam um histórico na base de dados. Qualquer falha ou degradação ocorrida em equipamentos monitorados incorrerá na existência de uma ficha de falha, a partir da qual serão realizadas análises de falha ou de degradação. Este é considerado o primeiro nível de análise;
- **Dados extraídos** – Dados derivados da experiência com equipamentos similares, levando em consideração as condições de projeto, operação e manutenção, e limitados a um período de observação que poderá ser tão grande quanto maior a experiência da equipe;

Então, o engenheiro de confiabilidade deve analisar e tratar os dados obtidos a fim de defini-los como (ESREDA, 1999):

- **Dados Validados** – Dados extraídos não tratados sujeitos a um processo de validação, levando em conta acurácia e relevância destes com relação a objetivos bem definidos (segurança, manutenção, etc). Outra opção é a análise da falha também para um objetivo bem definido (e.g. falhas críticas para segurança), consistindo em um segundo nível de análise;
- **Dados de Confiabilidade Processados** – Consiste na taxa de falha em operação ( $\lambda$ ), probabilidade de falha na demanda (PFD), tempo médio de reparo e razão de indisponibilidade. Esses dados são obtidos por uma sequência de processamentos e não simplesmente por cálculos diretos. Etapas como escolha de uma amostra relevante, levantamento de dados não tratados e processamento são as principais para a obtenção de dados de confiabilidade;
- **Dados de Confiabilidade para Segurança (*PSA for safety*)** – Dados processados relevantes somente para segurança, ou seja, falhas que possuem

grande possibilidade de gerar eventos não aceitáveis perante um nível de segurança exigido;

- **Dados de Confiabilidade para Manutenção (RCM – *Reliability Centered Maintenance*)** – Dados de falha e degradação processados relacionados a todos os níveis do equipamento, apresentando as possíveis causas de modos de falha;
- **Dados de Referência** – Dados gerais que são considerados pelo senso comum como sendo razoáveis para uso como padrão ou base para comparação com dados observados. Esses dados processados podem ser relacionados à segurança ou manutenção;
- **Dados de *Handbooks*** – Conjunto de dados oriundos de processos de validação, processamento e análise de especialistas. Esses dados são organizados de modo a serem fonte de consulta e são comumente utilizados para estudos de RAM durante a fase de projeto (ESREDA, 1999) e quando não há registros de falha para determinado equipamento de uma unidade industrial. Dessa forma, dados de *handbooks* são utilizados quando não há registros de falha de equipamentos da planta estudada, seja pela mesma ainda não ter entrado em operação, por não ter tempo de operação suficiente para observação de um número razoável de falhas ou devido a possuir registros de baixa qualidade (desorganizados, incompletos, não-rastreáveis, etc).

De maneira geral, o trabalho em engenharia de confiabilidade para estudos de RAM está principalmente relacionado à condução do levantamento de dados, sejam eles extraídos junto à operação e manutenção da planta por entrevista ou estudos de FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) ou FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), e o processamento dos resultados de simulações voltadas para a definição dos parâmetros de confiabilidade da planta industrial.

## 5. Conceitos em Estatística

### 5.1. Definições Básicas

Segundo LAWLESS (2002), seja uma variável única de tempo de vida,  $T$ , positiva e aleatória que representa o tempo de vida de cada elemento de uma população. Assim, sua função de densidade de probabilidade (PDF - *Probability Density Function*) é denominada  $f(t)$  e sua função cumulativa de distribuição (CDF - *Cumulative Distribution Function*) é denominada  $F(t)$  de modo que:

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t f(x)dx \quad (8)$$

Assim, a probabilidade de um componente da população sobreviver até o tempo  $t$  é dada pela função sobrevivência que significa, no contexto deste trabalho, a função confiabilidade.

$$R(t) = \Pr(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (9)$$

É importante ressaltar que  $R(t)$  é, devido à definição de  $f(t)$ , monótona, decrescente, contínua com:

$$R(0) = 1 \quad (10)$$

$$R(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad (11)$$

Além disso, o  $p$ -ésimo quantil da distribuição de  $T$  é o valor  $t_p$  tal que:

$$\Pr(T \leq t_p) = p \quad (12)$$

A função hazard por sua vez tem a interpretação da taxa instantânea de falha no tempo  $t$ , dado que o mesmo não falhe antes:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t \leq T < t + \Delta t : T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (13)$$

Dessa forma,  $h(t)\Delta t$  é a probabilidade de falha em  $[t, t + \Delta t)$ .

É conveniente derivar expressões para  $R(t)$  e  $f(t)$  em termos de  $h(t)$ :

$$h(t) = -\frac{d}{dt} \log R(t) \quad (14)$$

$$\log R(t)_0^t = -\int_0^t h(s) ds \quad (15)$$

Como  $R(0)=1$ :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t h(s) ds\right) \quad (16)$$

Definindo a função hazard cumulativa:

$$H(t) = \int_0^t h(s) ds \quad (17)$$

Assim:

$$R(t) = \exp[-H(t)] \quad (18)$$

Já que  $R(\infty) = 0$ , portanto  $H(\infty) = \infty$ . Dessa forma, conforme deduzido por LAWLESS (2002):

$$f(t) = h(t) \exp\left(-\int_0^t h(t) dt\right) \quad (19)$$

## 5.2. Distribuições de Tempo de Vida – Modelos Contínuos

A análise da variação das taxas de falha com o tempo passa necessariamente pela etapa de ajuste a uma distribuição específica. A seguir estão apresentadas as duas principais distribuições estatísticas de modelos paramétricos utilizadas para ajuste de dados de falha de equipamentos industriais (LAWLESS, 2002). As distribuições Exponencial e de Weibull serão utilizadas neste trabalho para verificar a influência do envelhecimento de equipamentos na eficiência de unidades industriais.

### 5.2.1. Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é a primeira opção de distribuição para aplicações em engenharia de confiabilidade. No entanto, a boa aderência da mesma à realidade observada em campo está condicionada principalmente às considerações de manutenções corretivas perfeitas e ao cumprimento das manutenções preventivas segundo estabelecido pelos fabricantes. A característica mais marcante dessa distribuição é possuir uma função hazard constante, isto é:

$$h(t) = \lambda \quad t \geq 0 \text{ e } \lambda > 0 \quad (20)$$

Ou seja, a taxa de falha é constante, e aplicando-se esse fato nas definições das equações de função de densidade de probabilidade (PDF) e confiabilidade definidas pelas equações (18) e (19), são obtidas, respectivamente:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda \cdot t) \quad (21)$$

$$R(t) = \exp(-\lambda \cdot t) \quad (22)$$

Utilizando a parametrização  $\theta = \lambda^{-1}$ , a PDF se resume a:

$$f(t) = \theta^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (23)$$

Assim, a média e variância da distribuição são, respectivamente:

$$\sigma = \theta \quad (24)$$

$$\sigma^2 = \theta^2 \quad (25)$$

Aplicando a definição, a CDF da distribuição exponencial é:

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda.t) \quad (26)$$

O gráfico da PDF e da função hazard para uma distribuição exponencial padrão, isto é, com  $\theta = 1$ , e  $\lambda = 1$  está apresentado na Figura 4, demonstrando a função hazard constante e o comportamento monótono decrescente da PDF.

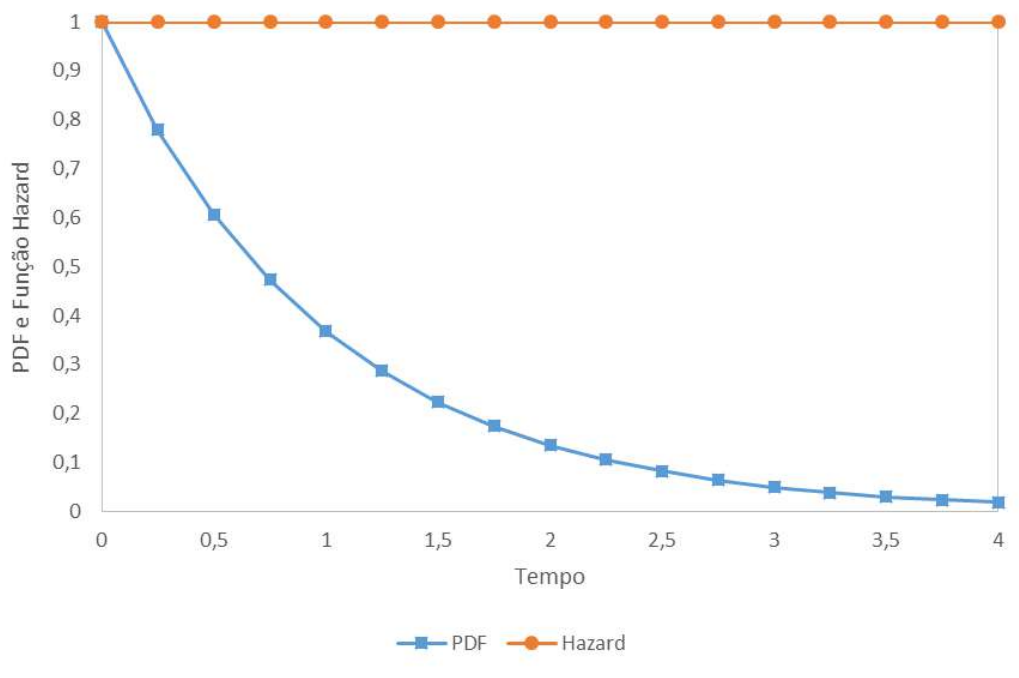


Figura 4 - PDF e Função hazard: Distribuição Exponencial Padrão ( $\theta=1$  e  $\lambda=1$ )

### 5.2.2. Distribuição de Weibull – Modelo a Dois Parâmetros

A distribuição de Weibull é, possivelmente, o modelo de distribuição de tempo de vida mais largamente utilizado (LAWLESS, 2002). A função hazard dessa distribuição é mostrada na equação abaixo.

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (27)$$

Aplicando-se essa função hazard à definição da PDF e função confiabilidade, temos:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (28)$$

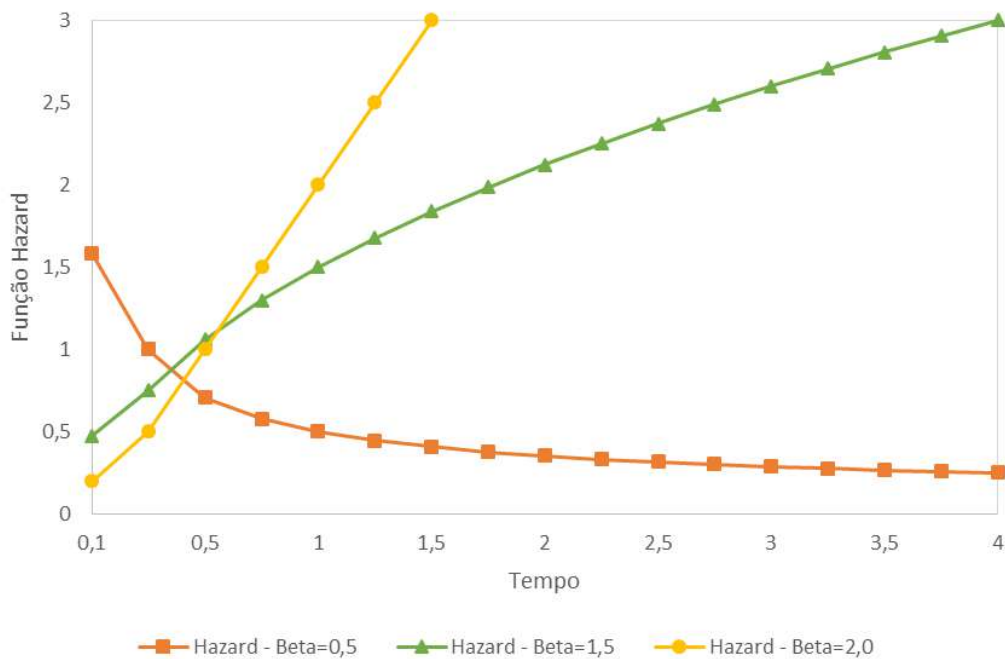
$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (29)$$

E, aplicando à definição da CDF:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (30)$$

Válidas para  $t > 0$ , sendo  $\eta > 0$ , vida característica, e  $\beta > 0$ , fator de forma, parâmetros da distribuição de Weibull que devem ser estimados por técnicas específicas que serão descritas mais à frente neste texto.

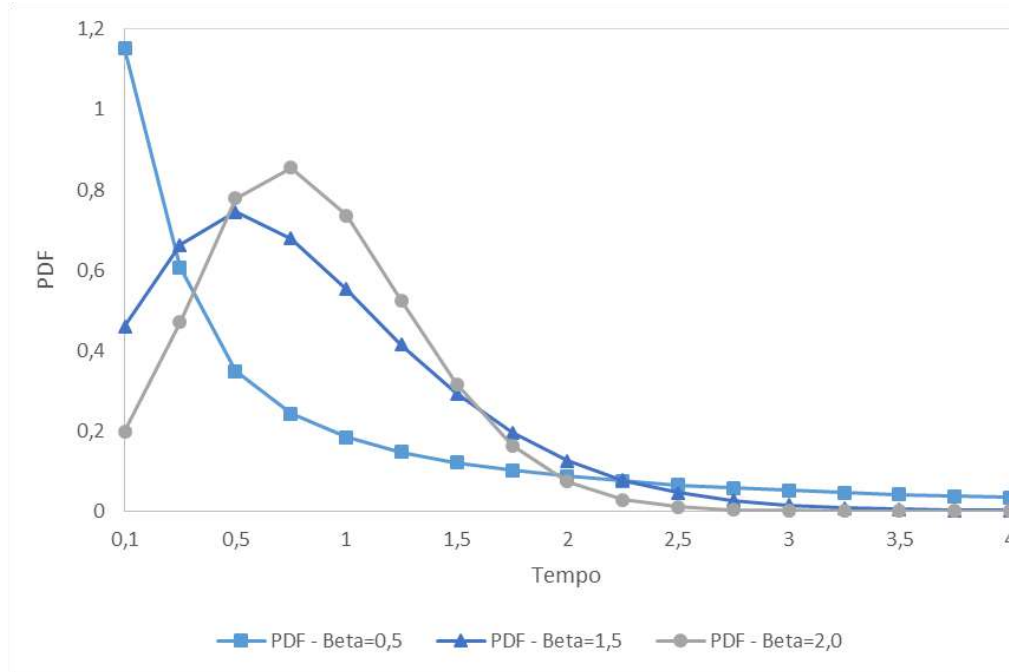
O valor do fator de forma ( $\beta$ ) segue uma tendência claramente relacionada às características inerentes de cada modo de falha. Assim, quando  $\beta < 1$  a função hazard é decrescente, o que sugere um comportamento claro de morte prematura. Quando  $\beta > 1$  a função é crescente, a relação é com a fase de *wear out*, ou seja, envelhecimento. Por sua vez, quando  $\beta = 1$ , a função é constante, representando um comportamento de taxa de falha constante no tempo (distribuição exponencial), normalmente associado a eventos aleatórios no tempo, ou seja, sem influência de envelhecimento. São mostrados, na Figura 5 e Figura 6 respectivamente, o comportamento da função hazard e da PDF (ordenadas), para  $\eta = 1$  e diferentes valores de fator de forma em função do tempo. Cabe ressaltar ainda que o fator de forma afeta diretamente a taxa de (de)crecimento da função hazard e PDF, conforme pode ser verificado a seguir.



**Figura 5 - Função Hazard para diferentes Fatores de Forma ( $\eta=1$ )**



Cabe ressaltar que, para valores de  $\beta$  maiores que 1, o valor da função hazard aumenta tão mais rápido quanto maior desse parâmetro, conforme sugerido pela equação (27).



**Figura 6 - PDF para diferentes Fatores de Forma ( $\eta=1$ )**

É importante destacar que a integral, em todo o espaço, da PDF deve ser igual a 1. Dessa forma, não há inconsistência no fato da PDF ser maior que 1, conforme verificado para  $\beta = 0,5$ , desde que a integral desta função no intervalo de tempo  $[0, \infty)$  seja igual a 1.

Nota-se pelos gráficos que o valor do fator de forma modifica a forma da PDF e da função hazard, fato que implica na variação da taxa de falha dos equipamentos ao longo do tempo e faz com que a premissa de taxa de falha constante nem sempre seja aplicável.

### 5.3. Métodos para Estimativa dos Parâmetros de Distribuições Estatísticas

Pode-se dividir em dois grupos os métodos para estimativa dos parâmetros de distribuições estatísticas: os Métodos Gráficos, baseados na linearização das CDF e ranqueamento dos registros de falha; e os Métodos Analíticos, baseados no cálculo analítico de estimadores. Obviamente, a utilização desses métodos só faz sentido

para modelos com dois ou mais parâmetros, como o caso do modelo de Weibull. Isso se dá uma vez que, como no caso da distribuição exponencial, o cálculo do único parâmetro pode ser feito de maneira muito simples e direta. Dessa forma, os métodos descritos a seguir serão demonstrados somente para a distribuição de Weibull.

### 5.3.1. Métodos Gráficos

Segundo AL-FAWZAN (2000), os métodos gráficos são largamente utilizados devido, principalmente, a sua simplicidade. No entanto, os mesmos não são adequados quando demanda-se grande precisão, uma vez que estão sujeitos a pequena precisão de leitura.

#### 5.3.1.1. Gráfico de Probabilidade de Weibull

Seja a função cumulativa da distribuição (CDF) para a distribuição de Weibull a dois parâmetros conforme mostradas na equação (30). Tomando-se o logaritmo natural duas vezes, obtem-se a equação de uma reta conforme verificado na equação (31) (AL-FAWZAN, 2000).

$$\ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(\eta) \quad (31)$$

Para o cálculo dos parâmetros de Weibull, segue-se o seguinte procedimento:

- i. Classificar os tempos para falhar (TTF – *Time to Failure*) em ordem crescente;
- ii. Estimar  $F(t_i)$  da  $i$ -ésima falha por um dos métodos apresentados na Tabela 1;
- iii. Plotar o gráfico da equação 31 utilizando os valores de  $F(t_i)$  calculados;
- iv. O fator de forma ( $\hat{\beta}$ ) e a vida característica ( $\hat{\eta}$ ) estimados serão, respectivamente:

$\hat{\beta}$  = coeficiente angular da reta

$$\hat{\eta} = \exp\left(\frac{\text{coeficiente linear}}{\hat{\beta}}\right) \quad (32)$$

Tabela 1 - Métodos para estimativa de  $F(t_i)$

Método	$F(t_i)$
Classificação pela Média	$\frac{i}{n+1}$
Classificação pela Mediana	$\frac{i-0,3}{n+0,4}$
CDF Simétrica	$\frac{i-0,5}{n}$

### 5.3.1.2. Gráfico da Função Hazard

A técnica do Gráfico da Função Hazard é baseada em plotar a função cumulativa de hazard linearizada contra os tempos de falha e obter os parâmetros de Weibull a partir dos coeficientes da reta (AL-FAWZAN, 2000). A partir da equação (27), que demonstra a função hazard da distribuição de Weibull, define-se a função cumulativa de hazard como:

$$H(t) = \int_0^t h(t) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \quad (33)$$

Tomando-se o logaritmo natural, obtém-se:

$$\ln(t) = \frac{1}{\beta} \cdot \ln[H(t)] + \ln(\eta) \quad (34)$$

Assim, para o cálculo dos parâmetros de Weibull, segue-se o seguinte procedimento:

- i. Classificar os tempos para falhar (TTF – Time to Failure) em ordem crescente;

- ii. Para cada falha, calcular  $\Delta H_i = \frac{1}{(n+1)-1}$ ;
- iii. Calcular  $H = \sum_{i=1}^n \Delta H_i$
- iv. Plotar o gráfico da equação 34;
- v. O fator de forma ( $\hat{\beta}$ ) e a vida característica ( $\hat{\eta}$ ) estimados serão, respectivamente:

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\text{coeficiente angular da reta}} \quad (35)$$

$$\hat{\eta} = t \quad \text{em } H = 1 \quad (36)$$

### 5.3.2. Métodos Analíticos

Os métodos analíticos são utilizados tipicamente quando uma maior precisão no cálculo dos parâmetros de distribuições estatísticas. Atualmente são de fácil implementação e os cálculos muito rápidos devido à utilização de planilhas eletrônicas e *softwares* comerciais. Cabe ressaltar que os métodos analíticos não serão utilizados no estudo de caso, no entanto, é importante apresentá-los de modo a tornar este texto o mais completo. AL-FAHZAN (2000) apresenta os métodos analíticos para obtenção dos parâmetros de Weibull conforme mostrado a seguir.

#### 5.3.2.1. Estimador de Máxima Verossimilhança – Maximum Likelihood Estimator (MLE)

O método da Máxima Verossimilhança deduzido por HARTER e MOORE (1965a, 1965b) e COHEN (1965) é um procedimento comumente utilizado devido a suas importantes propriedades, por exemplo (MYUNG, 2002):

- **Suficiência**; isto é, informações completas sobre o parâmetro de interesse estão contidas em seu estimador;
- **Consistência**; ou seja, o valor real do parâmetro é obtido quando há uma amostra suficientemente grande disponível; dentre outras.

Seja uma amostra de  $n$  elementos  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  com PDF  $f_x(x, \theta)$  em que  $\theta$  é um parâmetro da distribuição. A função probabilidade dessa amostra aleatória é o produto das  $n$  variáveis aleatórias e é função do parâmetro  $\theta$ , ou seja:

$$L = \prod_{i=1}^n f_{x_i}(x_i, \theta) \quad (37)$$

O estimador de máxima verossimilhança  $\hat{\theta}$  é o valor de  $\theta$  que maximiza  $\log L$  que, em última análise, corresponde a maximizar  $L$ . Logo, o MLE (Estimador de Máxima Verossimilhança) de  $\theta$  é, comumente, a solução de  $\frac{d(\log L)}{d\theta} = 0^*$ .

Dessa forma, todas as soluções devem ser função dos elementos da amostra  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  e estar no espaço amostral do parâmetro. Aplicando estes conceitos para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull, tem-se:

$$L(x_1, \dots, x_n, \beta, \eta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{x_i}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x_i}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (38)$$

Tomando o logaritmo da equação acima e derivando em relação a  $\beta$  e  $\eta$ :

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(x_i) - \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \cdot \ln(x_i) = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial \eta} = -\frac{n}{\eta} + \frac{1}{\eta^2} \sum_{i=1}^n x_i^\beta = 0 \quad (40)$$

Eliminando  $\eta$  em ambas as equações e simplificando, obtém-se:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\beta \cdot \ln(x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^\beta} - \frac{1}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln(x_i) - \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^n x_i^\beta \cdot \ln(x_i) = 0 \quad (41)$$

Resolvendo-se a equação acima por algum método numérico como Newton-Raphson, obtém-se o estimador para o fator de forma  $\hat{\beta}$ . Obtido o fator de forma, pode-se calcular o estimador da vida característica  $\hat{\eta}$ :

$$\hat{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^\beta}{n} \quad (42)$$

### 5.3.2.2. Método dos Momentos (MOM – *Method Of Moments*)

Sejam os números  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representantes de uma base de dados, então um estimador não-tendencioso para o k-ésimo momento é dado por:

$$\hat{m}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k \quad (43)$$

Para a distribuição de Weibull, o k-ésimo momento é dado por:

$$\hat{\mu}_k = \left(\frac{1}{\eta^\beta}\right)^{\frac{-k}{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{k}{\beta}\right) \quad (44)$$

Em que a função gama é dada por:

$$\Gamma(s) = \int_0^{\infty} x^{s-1} \cdot \exp[-x] dx; \quad \text{com } s > 0 \quad (45)$$

E o primeiro e segundo momentos são, respectivamente:

$$m_1 = \hat{\mu}_k = \left(\frac{1}{\eta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (46)$$

$$m_2 = \hat{\mu}_k^2 + \hat{\sigma}_k^2 = \left(\frac{1}{\eta}\right)^{\frac{2}{\beta}} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right\} \quad (47)$$

Fazendo-se a razão entre  $m_2$  e  $m_1^2$ :

$$\frac{m_2}{m_1^2} = \frac{\widehat{\sigma}_k^2}{\widehat{\mu}_k^2} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (48)$$

Tomando a raiz quadrada, obtemos o Coeficiente de Variação (CV):

$$CV = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (49)$$

O procedimento para determinação do fator de forma estimado,  $\hat{\beta}$ , consiste em calcular os valores de CV para diferentes  $\beta$  utilizando a equação (49). Assim, basta comparar os valores de CV com o  $CV_d$ , ou seja, o coeficiente de variação dos dados reportados, e encontrar o valor de  $\hat{\beta}$  correspondente. A vida característica estimada, por sua vez, é obtida pela equação (50).

$$\hat{\eta} = \left\{ \frac{\bar{x}}{\Gamma\left[\left(\frac{1}{\hat{\beta}}\right) + 1\right]} \right\}^{\hat{\beta}} \quad (50)$$

Em que  $\bar{x}$  é a média dos dados.

### 5.3.2.3. Método dos Mínimos Quadrados (Least Squares Method - LSM)

O Método dos Mínimos Quadrados (LSM) é largamente utilizado em problemas de engenharia e muito poucas vezes relacionado à estimativa de parâmetros de distribuições estatísticas. Este método utiliza a linearização da equação (30), demonstrada anteriormente:

$$\ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \right] = \beta \cdot \ln(\eta) - \beta \cdot \ln(t) \quad (51)$$

Escrevendo:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left\{ \ln \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{i}{n+1}\right)} \right] \right\} \quad (52)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (53)$$

Assim, pode-se estimar o fator de forma e a vida característica:

$$\hat{\beta} = \frac{\left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \cdot \ln \left\{ \ln \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{i}{n+1}\right)} \right] \right\} \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln \left\{ \ln \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{i}{n+1}\right)} \right] \right\} \right\}}{\left\{ n \cdot \sum_{i=1}^n [\ln(x_i)]^2 \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \right\}^2} \quad (54)$$

$$\hat{\eta} = \exp \left( \bar{y} - \frac{\bar{x}}{\hat{\beta}} \right) \quad (55)$$



## 6. Simulação de Eventos Discretos e o Método de Monte Carlo

Segundo KROESE *et. al.* (2011), simulações via Método de Monte Carlo diferem das simulações de larga escala uma vez que estas têm como objetivo entender como funcionam os sistemas reais pela sua imitação via computação. O método de Monte Carlo, por sua vez, envolve simples algoritmos para computar quantidades numéricas, probabilidades, que são formuladas em termos de eventos aleatórios (KROESE *et. al.*, 2011). Dessa forma, simulações de larga escala naturalmente necessitam de um maior nível de modelagem e estrutura de programação que o Método de Monte Carlo. A seguir são apresentados os conceitos necessários para o entendimento do Método de Monte Carlo e as etapas que compõem uma simulação em eventos discretos baseada no mesmo.

### 6.1. Modelos de Simulação

Modelos de simulação têm por objetivo emular o comportamento de sistemas reais. É importante, dessa forma, definir claramente este conceito. Segundo KROESE *et.al.* (2011), sistema é uma coleção de entidades interativas ou objetos formando um todo complexo. Apesar de parecer um conceito vago, há na literatura várias analogias para facilitar o entendimento do mesmo, por exemplo (KROESE *et.al.*, 2011):

Supondo que os clientes cheguem à agência de correios e se organizem em uma fila única que é compartilhada por diversos balcões de atendimento. Após o atendimento, cada cliente tem a opção de deixar a agência ou entrar novamente na fila para realizar uma nova transação. Nessa analogia, os *objetos* desse sistema são os clientes, os atendentes e a fila. Cada um desses *objetos* é caracterizado por determinados *atributos* numéricos como quantidade de lugares disponíveis na fila, os tipos de clientes, isto é, sua prioridade de atendimento, o tempo de atendimento para cada serviço, dentre outros. Dessa forma, os atributos e a interação entre os objetos determinam o comportamento do sistema ao longo do tempo.

Para KROESE *et. al.* (2011), o entendimento do comportamento de um sistema real consiste, primeiramente, em conceber um modelo matemático que resuma as

partes essenciais do sistema em linguagem matemática, envolvendo variáveis, parâmetros, relações, diagramas e outras informações relevantes. No entanto, um modelo útil para representar a realidade é uma mistura de realismo e simplicidade. Quanto mais simples o modelo, maior a facilidade da sua resolução analítica. No entanto, a tendência natural dos sistemas reais de interesse em engenharia é serem complexos, envolvendo muitos parâmetros, variáveis e objetos. Dessa forma, a resolução numérica é necessária, uma vez que a complexidade do modelo torna a resolução analítica muitas vezes inviável. Na Figura 7 é apresentado um esquemático do processo de simulação de um sistema real.

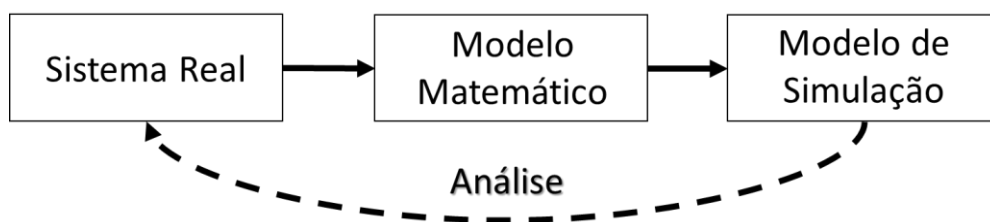


Figura 7 - Processo de Simulação de um Sistema Real (Traduzido de KROESE *et. al.*,2011)

Um modelo matemático para o exemplo da agência de correio é um sistema de filas, em que os clientes chegam em tempos aleatórios, esperam em filas, são atendidos por tempos aleatórios e se deslocam novamente para filas ou deixam a agência. No entanto, em um modelo desse tipo, diferentemente da vida real, o horário de chegada e tempo de atendimento para cada cliente são descritos por leis de probabilidade precisas, assim como as restrições estabelecem regras específicas a serem seguidas na simulação. Um sistema de filas é um típico exemplo de **sistema de eventos discretos**, uma vez que o estado do mesmo é alterado discretamente no tempo de acordo com a ocorrência de eventos. Na prática, tais sistemas são naturalmente estocásticos e dinâmicos, já que envolvem variáveis aleatórias e evoluem ao longo do tempo (KROESE *et. al.*, 2011).

## 6.2.Sistemas de Eventos Discretos

Aplicações para modelos de sistemas de eventos discretos são encontradas em vários campos de engenharia como produção, logística, telecomunicações e confiabilidade. Há dois atores principais em uma simulação desse tipo (KROESE *et. al.*,2011):

- **Estado do Sistema:** Coletânea de variáveis/atributos necessários para descrever o sistema em um determinado tempo, relativo ao objeto de estudo.
- **Evento:** Uma ocorrência instantânea que muda o estado do sistema. Cada evento é caracterizado por um:
  - Tempo, no qual o evento ocorre e;
  - Tipo, que determina como o evento afeta o estado do sistema no tempo em que ocorre e posteriormente.

Sistemas de eventos discretos são observados somente no tempo de ocorrência do evento. Em intervalos entre tempos de ocorrência de eventos, o sistema só se altera deterministicamente. Uma vez que sistemas de eventos discretos são naturalmente dinâmicos, é necessário lançar mão de um mecanismo chamado relógio de simulação para avançar o tempo simulado de um evento para o próximo. A fim de manter um registro de eventos, a simulação mantém uma lista dos eventos pendentes em ordem cronológica.

Há, basicamente, duas abordagens para a implementação de simulações de eventos discretos (KROESE *et. al.*, 2011):

- **Orientada a Evento:** Subrotinas isoladas são especificadas para cada tipo de evento. Cada subrotina atualiza o estado do sistema e programa novos eventos, que são adicionados à lista. A rotina principal faz a evolução de um evento para o próximo da lista e, por conseguinte, inicia a subrotina correspondente, promovendo a evolução temporal no tempo da simulação.
- **Orientada a Processo:** Eventos podem ser agrupados em processos, ou seja, sequências de eventos relacionados. Um processo é visto como um programa que pode ser interrompido e (re)ativado em determinados tempos, além de manipular outros processos. A diferença primordial entre a abordagem orientada a eventos e a orientada a processos é que nesta, diferentemente da primeira, há uma lista de processos ao invés de uma lista de eventos. Dessa forma, o relógio de simulação avançaria de acordo com o tempo de cada processo e não de cada evento.

### 6.2.1. Simulação de Eventos Discretos Orientada a Evento

Uma vez que o *software* utilizado neste trabalho para a simulação de eventos discretos, MAROS (*Maintainability, Availability, Reliability and Operability Simulation*), utiliza a abordagem orientada a eventos, é importante descrever a mesma em maiores detalhes. O procedimento generalizado utilizado por *softwares* para simulação de eventos discretos via abordagem orientada a eventos é apresentado a seguir, segundo descrito por KROESE *et. al.* (2011).

Primeiramente, o programa inicializa variáveis, contadores estatísticos e parâmetros do sistema, além de gerar a lista de eventos. Em seguida, o relógio de simulação é implementado em um laço que consiste em três etapas:

- Determinar o tipo e tempo do evento atual, que consta no topo da lista de eventos;
- Iniciar uma subrotina correspondente ao evento atual;
- Reunir dados estatísticos e avançar para o próximo evento da lista.

Essas etapas são repetidas até que o tempo final de simulação seja atingido. Por fim, toda a informação estatística reunida durante a simulação é reportada e a mesma é finalizada. Na Figura 8 é mostrado o fluxograma desse procedimento generalizado para simulações de eventos discretos orientadas a eventos.

Os principais esforços de modelagem e programação estão relacionados à especificação das subrotinas de cada evento, já que para cada evento é necessária a especificação de como o estado do sistema e demais componentes da simulação (contadores, etc) são afetados pelo mesmo. Outro fator que aumenta o esforço computacional é a incorporação de eventos acionados pelo evento atual à lista. A exemplificação do acionamento de um evento por outro pode ser visto na Figura 9, em que os círculos representam eventos e as flechas arqueadas demonstram o acionamento de um evento por outro.

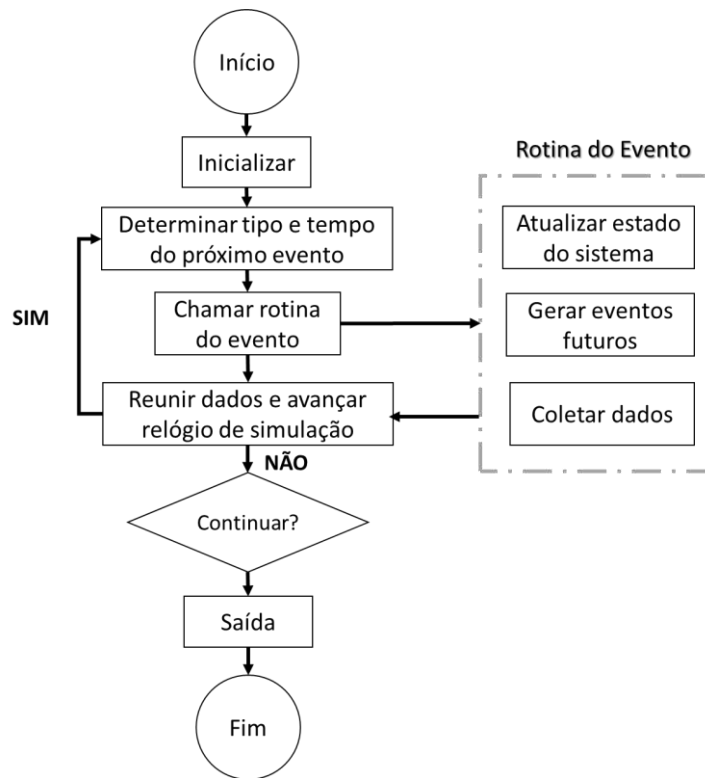


Figura 8 - Fluxograma Geral de Simulações de Eventos Discretos Orientadas a Eventos (Traduzido de KROESE et.al., 2011)

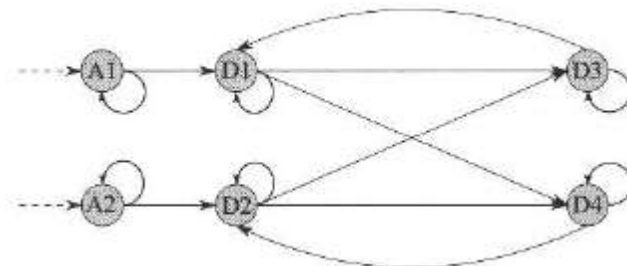


Figura 9 - Acionamento em Cascata de Eventos (KROESE et.al., 2011)

Em suma, os passos para a realização de uma simulação por eventos discretos orientada a eventos são:

1. Elaborar um modelo matemático/estatístico para o sistema;
2. Identificar o estado do sistema, dependendo do aspecto que se deseja analisar (confiabilidade, etc);
3. Definir as estruturas de dados apropriadas: filas, listas, variáveis, contadores, etc;
4. Identificar os eventos possíveis e suas interações;
5. Definir uma lista de eventos e a rotina de simulação;
6. Implementar as subrotinas para cada um dos eventos possíveis;

7. Testar e depurar para checar por erros de programação e verificar se o sistema comporta-se conforme esperado. Usualmente é uma etapa que exige tempo e dedicação, a fim de validar a simulação;
8. Realizar a análise estatística dos resultados obtidos;
9. Gerar o relatório de resultados.

Por fim, cabe ressaltar alguns conceitos e nomenclaturas utilizadas pelo *software* MAROS que estarão presentes neste trabalho (DNV, 2012):

- **Ciclo de Vida** - é uma sequência cronológica de eventos gerada aleatoriamente que representa o comportamento do sistema em tempo real para determinado tempo de vida definido pelo usuário. MAROS pode gerar um número infinito desses ciclos de vida sendo cada qual único, porém factível, para o comportamento deste determinado sistema na vida real. Dessa forma, analisando-se os resultados de muitos ciclos de vida gerados de maneira aleatória, obtém-se informações sobre a média do comportamento do sistema ao longo do seu tempo de vida simulado. Cabe ressaltar que, apesar dos eventos serem sorteados aleatoriamente, a probabilidade do sorteio de cada um deles é ponderado por uma probabilidade, atrelada aos dados de falha usado como entrada no *software*. Assim, quanto mais ciclos forem simulados, menor a tendência de um evento catastrófico, porém raro, impactar de maneira significativa a eficiência produtiva simulada da planta.
- **Eficiência Produtiva Média** - consiste na razão entre a quantidade produzida e a capacidade nominal da planta. Dessa forma, qualquer falha que cause parada ou diminuição da capacidade de processamento da planta afetará este parâmetro. No contexto do MAROS, a eficiência produtiva média é calculada para cada ciclo de vida simulado e, após a simulação de todos os ciclos de vida, é feita a média das eficiências por ciclo e obtida a Eficiência Produtiva Média ao longo do tempo de vida simulado. Dessa forma, quanto maior o número de ciclos de vida simulados menor será a variância em torno da média. A definição matemática da eficiência produtiva (EP) do ciclo de vida de uma unidade industrial está apresentada na equação 56

- **Desvio Padrão** - é o valor da raiz quadrada da variância. Esta, por sua vez, consiste no segundo momento central, ou seja, o segundo momento em torno da média, de uma variável aleatória X e é uma medida da variabilidade de todos os possíveis valores de X.

$$EP = \frac{\text{Produção realizada no ciclo de vida}}{\text{Capacidade nominal de produção no ciclo de vida}} \quad (56)$$

Um exemplo de ciclos de vida gerados para um sistema em particular, bem como a média de eficiência produtiva para 100 ciclos do mesmo estão demonstrados na Figura 10.

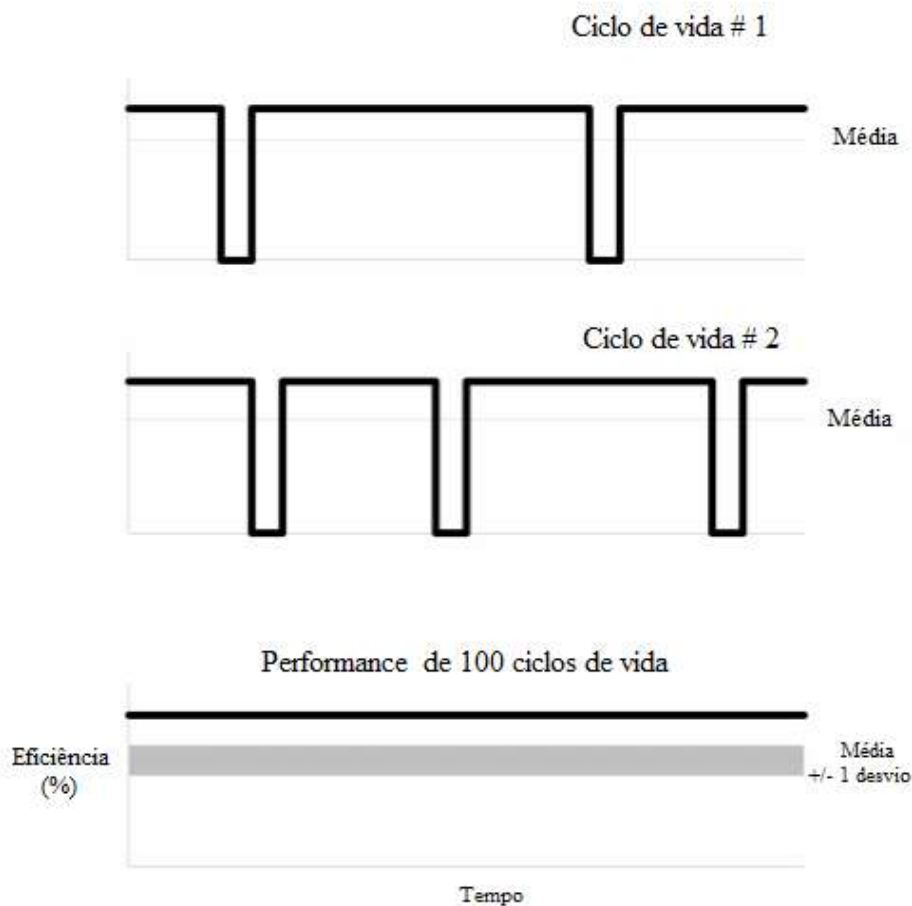


Figura 10 - Exemplo de Eficiência Média e por Ciclo de Vida

## 7. Sistemas de Suprimento de Ar de Instrumentos

Sistemas de ar de instrumentos, foco do estudo de caso deste trabalho, são de grande importância em unidades industriais pois fornecem ar para manipulação de válvulas de controle, visando manipular variáveis de interesse do processo, e válvulas de segurança. Cabe ressaltar que, apesar das referências desta seção tratarem da aplicação específica de sistemas de ar de instrumento a plantas nucleares, este sistema é de suma importância, conforme citado, para muitas outras unidades industriais. Tendo em vista, no entanto, o pioneirismo do setor nuclear na engenharia de confiabilidade é natural que a maior parte das referências desse assunto estejam ligados a aplicações em unidades nucleares. Dessa forma, falhas nesse sistema podem afetar a operação da planta, sendo que ocorrências desse tipo vêm se tornando cada vez mais frequentes e indicam que é necessária grande atenção aos sistemas de ar de instrumento (NMAC, 1990). As consequências de falhas no sistema de ar de instrumentos incluem, em plantas nucleares (INPO, 1988):

- SCRAM (*Safety Control Rod Axe Man*) do reator nuclear, que consiste na parada do mesmo;
- Mau funcionamento ou degradação de sistemas e componentes que podem:
  - Levar a planta a uma condição de operação diferente daquela de projeto;
  - Resultar em transientes severos;
  - Piorar a resposta da planta a perturbações transientes;
  - Dificultar a resposta do operador e as ações de recuperação de transientes.
- Reduções forçadas na geração de energia e paradas, resultando em diminuição da disponibilidade da planta.

Muitos arranjos diferentes são possíveis para sistemas de ar comprimido, um dos mais gerais é demonstrado no diagrama de fluxo de processo (PFD – *Process Flow Diagram*) da Figura 11.



NMAC (1990) descreve brevemente a função de cada equipamento demonstrado na Figura 11:

#### **Subsistema de Compressão de Ar:**

- **Filtros de entrada** – removem poeira e outros particulados do ar;
- **Compressor** – normalmente é composto por vários estágios de compressão, de modo que possa ser obtida maior eficiência energética. Isso ocorre pois, no caso de compressores multi-estágios, há na saída de cada estágio um resfriador e um vaso separador de condensado, reduzindo a temperatura do ar para condensar os líquidos e separando-os do ar, respectivamente. Assim, há diminuição do volume total a ser comprimido e, por conseguinte, da energia necessária para realizar o serviço.
- **Resfriadores de Ar Comprimido** – efetuam o resfriamento do ar que deixa o último estágio de compressão, condensando ainda uma pequena quantidade de líquidos;
- **Vaso separador de umidade** – separa o pouco condensado formado pelo resfriamento da corrente que deixa o compressor;
- **Vaso de armazenamento de ar** – atua como tanque de armazenagem e garante pressão constante no fornecimento de ar, mesmo com as variações de demanda da planta de processo.

#### **Subsistema de Secagem:**

A função desse subsistema é garantir que o ar atenda aos requisitos de qualidade da norma ANSI/ISA S7.3-1975, removendo umidade e particulados que possam ainda restar, de modo a garantir a aplicabilidade do mesmo aos instrumentos da planta.

- **Pré e pós filtros da secadora** – tem como função provocar a coalescência de gotas de líquido (umidade e fluido de lubrificação do compressor, por exemplo) e remoção de particulados sendo que, normalmente, operam em arranjo 2x100%, ou seja, possuem dupla redundância. Além disso, geralmente podem ser by-passados, sem grandes prejuízos para o processo. O único inconveniente é que, dessa

forma, há a passagem de algum líquido e poeira para a secadora, fazendo com que seja necessária uma maior frequência de realização de ciclos de regeneração da mesma.

- **Torre Secadora** – as secadoras refrigeradas trabalham a baixas temperaturas, induzindo a condensação dos líquidos de modo que possam ser drenados. Já as recheadas com dissecantes, usualmente alumina e/ou sílica, são divididas em dois tipos:
  - Regenerada por aquecimento, na qual a regeneração ocorre pelo aquecimento do leito dissecante e passagem de ar seco para purga;
  - Regenerada por ar seco somente, ou seja, a regeneração ocorre pela passagem de uma corrente de ar seco em contra-corrente que carrega o líquido.

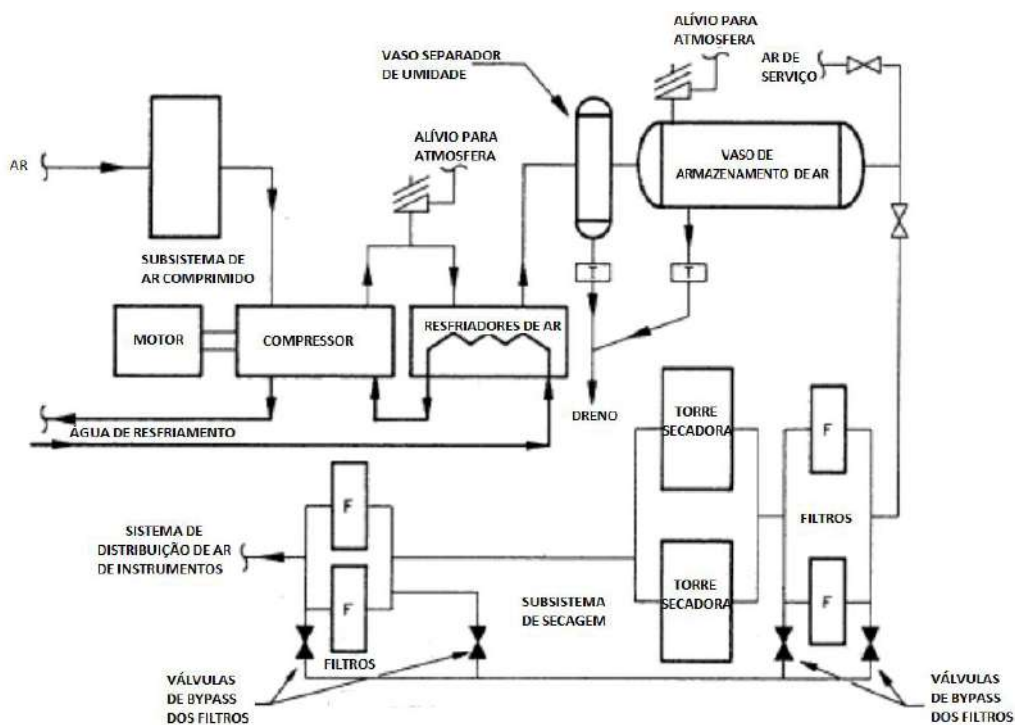


Figura 11 - PFD Geral de um Sistema de Ar de Instrumentos (Traduzido de NMAC, 1990)

Uma flexibilidade importante de ser ressaltada é que há a possibilidade da unidade de ar comprimido suprir tanto a necessidade de ar para instrumentação quanto para serviço. Além disso, há a preocupação de se instalar vasos acumuladores de ar de instrumentos que servem como redundância para garantir o fornecimento de ar de instrumentos para a parada segura da planta.

## 8. Metodologia

A fim de verificar a influência do envelhecimento de equipamentos de plantas industriais em sua eficiência produtiva e disponibilidade, foram realizadas simulações de eventos discretos orientadas a eventos, via Método de Monte Carlo. A metodologia utilizada para a viabilização das mesmas é descrita, em detalhes, neste capítulo.

Primeiramente, concebeu-se um modelo de diagrama de blocos de confiabilidade a fim de representar uma unidade típica de processo. Em seguida, realizou-se o tratamento estatístico das falhas de um banco de dados de unidades industriais, visando calcular os parâmetros das distribuições Exponencial e de Weibull para cada categoria de equipamento do Sistema de Ar de Instrumentos, além do MTTR para esses equipamentos. Os resultados desta etapa serviram de entrada para os casos simulados no *software* MAROS (desenvolvido pela DNV, que realiza simulações de eventos discretos orientadas a evento). Por fim, foram extraídos os resultados de eficiência produtiva, número médio de falhas e listados os maiores contribuintes para perdas de eficiência produtiva de cada caso de simulação. Cabe ressaltar que o MAROS consiste em um simulador que, diferentemente dos simuladores de processo, realiza sorteios aleatórios de eventos de falha.

### 8.1. Modelo e Casos de Simulação

Visando representar uma unidade comum em plantas industriais, foi adotado como fluxograma de processo (PFD – *Process Flow Diagram*) de uma unidade de ar de instrumentos aquele mostrado na Figura 11. Conforme mencionado, unidades desse tipo são vitais para qualquer tipo de planta industrial de processo, uma vez que é necessário garantir suprimento de ar seco e a pressão constante para a abertura e fechamento de válvulas pneumáticas e, portanto, permitir o controle instrumentado de processo e de segurança. Dessa forma, é imperativo que unidades de ar de instrumento possuam elevada confiabilidade, de modo que sejam evitadas paradas e, por conseguinte, as grandes perdas financeiras que estão envolvidas durante eventos de parada de plantas de processo.

A fim de avaliar a influência do envelhecimento do Sistema de Ar de Instrumentos na eficiência produtiva e no número de falhas de cada equipamento, foram definidos os seguintes casos de simulação:

- **Casos de Distribuição Exponencial:** Sistema de Ar de Instrumentos conforme definido no RBD da Figura 12 e dados de falha, segundo uma distribuição exponencial, simulando 250 ciclos para tempos de vida futura de 10, 20 e 50 anos;
- **Casos de Distribuição de Weibull:** Sistema de Ar de Instrumentos conforme definido no RBD da Figura 12 e parâmetros de Weibull ajustados pelos métodos do Gráfico de Probabilidade (Média, Mediana e CDF), simulando 250 ciclos para tempos de vida futura de 10, 20 e 50 anos.

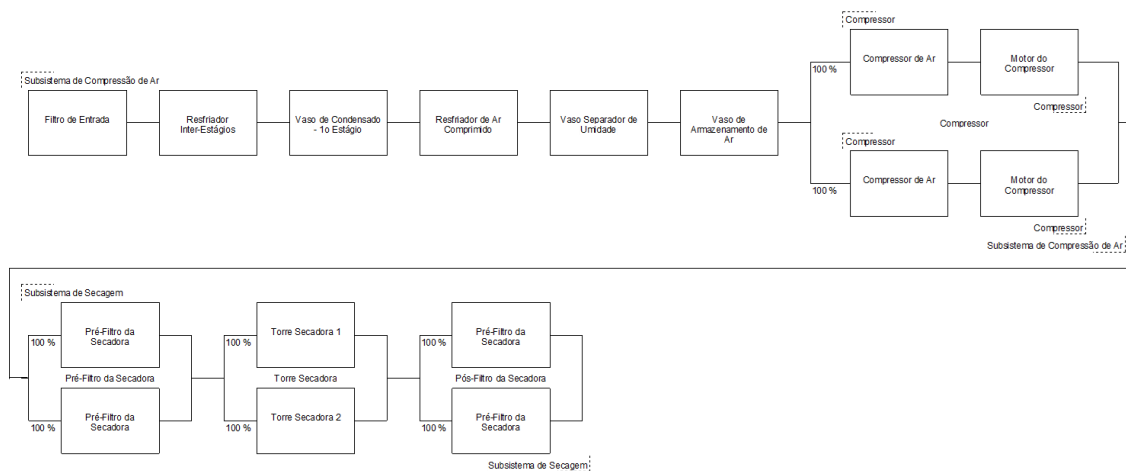


Figura 12 - RBD do Sistema de Ar de Instrumentos

É importante frisar que cada caso foi simulado por 250 ciclos de vida. Dessa forma, os resultados apresentados para cada caso são médias de 250 simulações para cada tempo de vida futura do Sistema de Ar de Instrumentos, visando garantir a convergência na eficiência produtiva média.

Durante a descrição dos sistemas considerados na análise, foi determinada a filosofia operacional da unidade quanto ao arranjo dos equipamentos no sistema, explicitando o nível de redundância existente para estes. Para isto, foi usada a representação de 1x100% (1 de 1), 2x100% (2 de 1), 3x50% (3 de 2), por exemplo, para os equipamentos.

O percentual de impacto destacado para os equipamentos foi considerado em relação à função desempenhada pelo mesmo. Em um arranjo 1x100%, por exemplo, há um único equipamento e este é capaz de suprir a necessidade operacional, enquanto em arranjo 2x100% há dois equipamentos, sendo um totalmente redundante ao outro. A implicação do arranjo dos equipamentos no primeiro caso é que, caso haja falha do equipamento, há a perda total da função que este desempenha, enquanto no segundo caso o equipamento totalmente redundante é capaz de continuar desempenhando a função requerida. Os demais arranjos seguem a mesma lógica, sendo o primeiro número o que representa a quantidade de equipamentos similares e o segundo a porcentagem da demanda total da função que o mesmo desempenha.

Cabe ressaltar que é praxe no projeto de sistemas de ar de instrumentos o arranjo 2x100% para os compressores e seus motores, principalmente devido à elevada confiabilidade requerida e ao número significativo de falhas dos mesmos. Dessa forma, apesar de não ressaltado na referência, será adotada como premissa a existência de um compressor e seu motor totalmente redundantes. Além disso, devido aos filtros não serem críticos para o sistema, ou seja, a falha dos mesmos não causaria indisponibilidade da unidade de ar de instrumentos já que há possibilidade de se operar pelo bypass, as falhas dos mesmos serão consideradas sem impacto na disponibilidade do sistema e, portanto, o mesmo não estará listado nos resultados.

## **8.2. Tratamento Estatístico de Falhas**

Um banco de dados de falha de diversas unidades industriais foi utilizado neste estudo, do qual foram extraídos os dados relativos aos equipamentos relacionados no item 8.1. Primeiramente, definiram-se as falhas relativas a cada equipamento considerado neste trabalho segundo as fronteiras dos equipamentos definidas na NBR-ISO 14224. A etapa seguinte foi a definição dos parâmetros das distribuições exponencial e de Weibull, segundo os métodos gráficos discutidos no item 5.3.1, para cada categoria de equipamento. São apresentados, na Tabela 2, as categorias dos equipamentos contempladas no estudo de caso, de acordo com o fluxograma de processo, Figura 11, e o diagrama de blocos de confiabilidade, Figura 12 de uma unidade de ar de instrumentos.

Conforme explicado anteriormente, as falhas dos filtros serão consideradas sem impacto, portanto, não houve a necessidade de se avaliar os dados de falha e reparo para os mesmos.

**Tabela 2 - Categorias de equipamentos consideradas no estudo**

<b>Categoria de Equipamento</b>
<b>Compressor</b>
<b>Motor Compressor</b>
<b>Vaso</b>
<b>Trocador de Calor</b>

### **8.2.1. Determinação dos Tempos de Reparo**

Devido à forma em que estavam organizados os registros de falha do banco de dados utilizado para este trabalho, não foi possível o estabelecimento de modos de falha segundo a norma NBR-ISO 14224. Admitindo-se que todos os equipamentos do banco de dados são similares, podem ser construídas funções de distribuição cumulativas de tempo de reparo, de modo a representar um tempo ponderado pelo número de ocorrências.

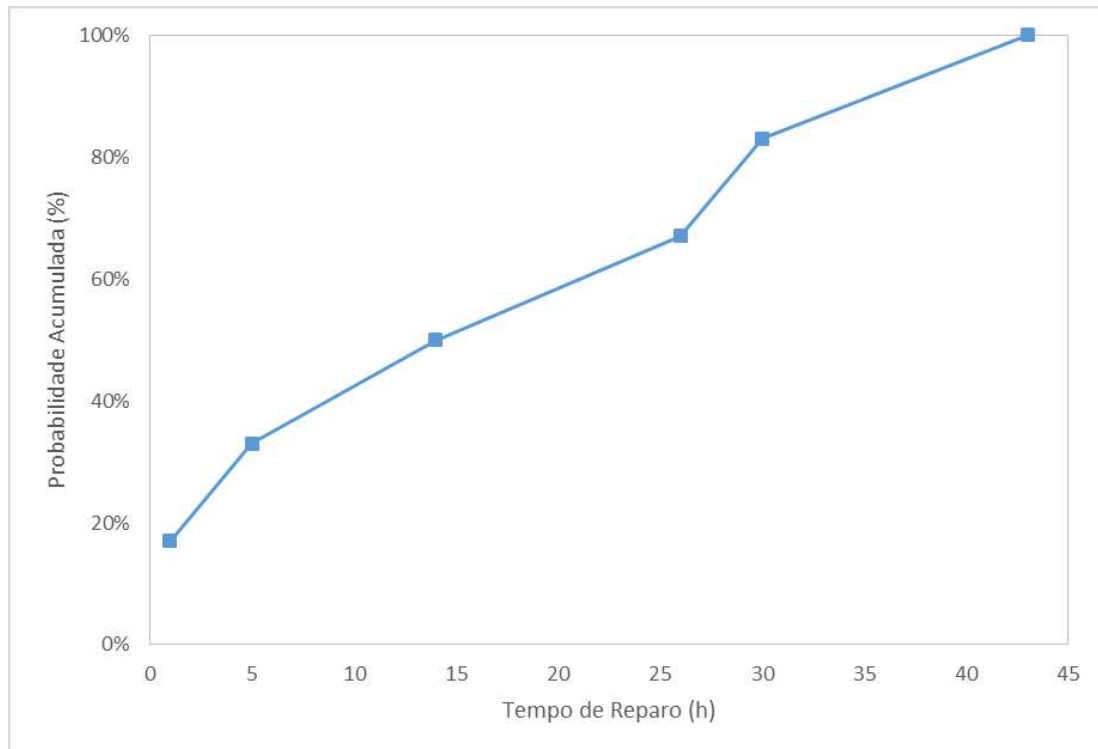
Primeiramente, foram contados todos os registros de falha de cada categoria de equipamento e os mesmos organizados em ordem crescente de tempo de reparo. Em seguida, para cada registro foi definida uma probabilidade, ou seja, o percentual de registros que possuem menor valor que o mesmo, conforme demonstrado no exemplo da Tabela 3.

**Tabela 3 - Dados de Reparo Hipotéticos de uma Categoria de Equipamento**

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada(%)</b>
1	17%
5	33%
14	50%
26	67%
30	83%
43	100%

Sendo um total de 6 registros de falha de uma determinada categoria de equipamento com tempos de reparo conforme Tabela 3 acima, conclui-se que cada

registro representa aproximadamente 16,7%, ou seja, 1/6 do número total de registros. Pela análise da Tabela 3, 100% dos registros possuem tempo de reparo menor que 43h, 83% possuem tempo de reparo menor que 30h e assim por diante. Assim, pode-se conceber um gráfico que demonstra esse comportamento, mostrado na Figura 13.



**Figura 13 – CDF de Tempos de Reparo - Dados Hipotéticos**

As funções de distribuição cumulativas (CDF) dos tempos de reparo para cada categoria de equipamento foram definidas segundo a metodologia descrita no item 8.2.1. Da Tabela 4 à Tabela 7 são demonstradas as CDF dos tempos de reparo obtidas para cada categoria de equipamento considerada no estudo de caso, estando esses dados apresentados de forma gráfica da Figura 14 à Figura 17. Cabe ressaltar que alguns valores de tempo de reparo iguais foram reportados, o que está representa que algumas falhas levaram o mesmo tempo para serem reparadas.

**Tabela 4 - Tempos de Reparo: Compressores**

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada (%)</b>
0,02	2%
0,03	5%
0,03	
0,05	8%
0,05	
0,08	11%
0,08	
0,18	12%
0,22	14%
0,53	15%
0,55	17%
0,77	18%
1,02	20%
2,00	22%
2,07	23%
3,00	25%
4,00	26%
4,18	28%
8,00	29%
12,00	34%
12,00	
12,00	

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada (%)</b>
14,58	35%
15,00	37%
16,75	38%
20,00	40%
20,85	42%
22,00	43%
24,00	48%
24,00	
24,00	
24,03	49%
31,00	51%
31,50	54%
31,50	
36,00	57%
36,00	
48,00	58%
64,25	60%
65,75	63%
65,75	
66,00	65%
72,00	66%
75,56	68%

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada (%)</b>
96,00	71%
96,00	
120,00	72%
126,00	74%
132,00	75%
144,00	77%
168,00	78%
180,00	80%
216,00	83%
216,00	
240,00	88%
240,00	
240,00	
264,00	92%
264,00	
264,00	
336,00	94%
408,00	95%
528,00	98%
528,00	
585,67	100%

A partir da análise dos resultados obtidos para os tempos de reparo dos compressores destaca-se que a probabilidade do reparo durar:

- Menos de 24 horas é de aproximadamente 48%;
- Menos de 2 horas ou mais de 7 dias é de cerca de 22%.

Além disso, a mediana da distribuição é, por interpolação, 27,5h e não são previstos reparos que demorem mais de 585,6h, aproximadamente.



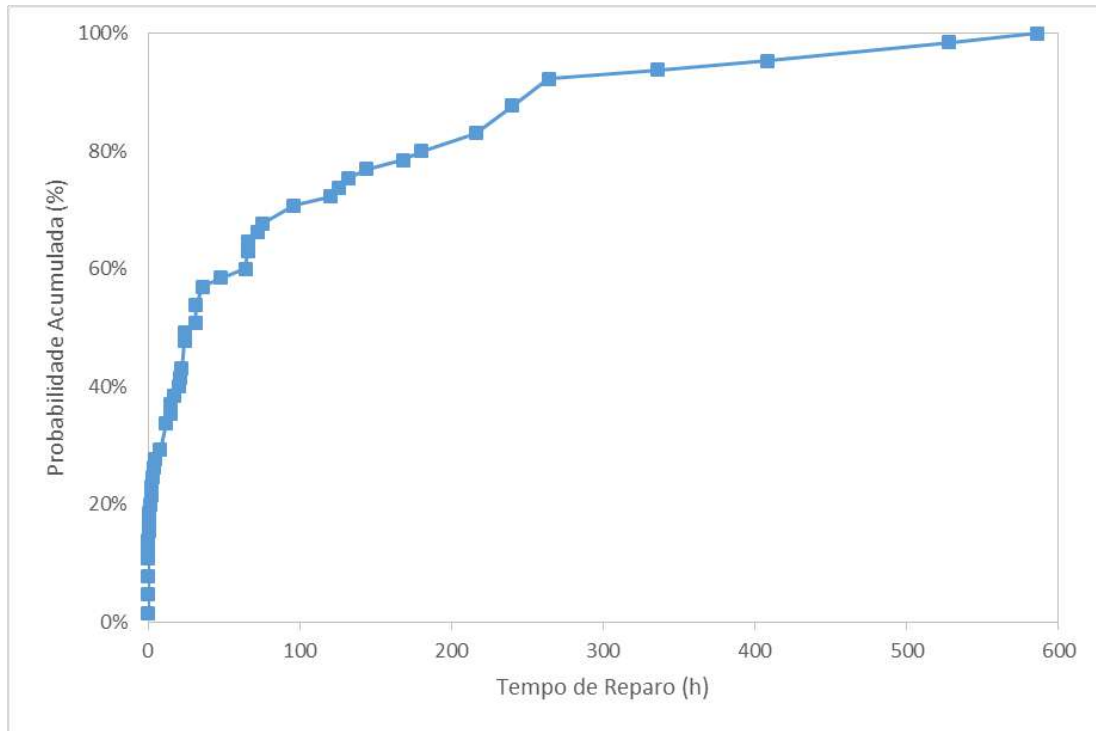


Figura 14 - CDF dos Tempos de Reparo: Compressores

Tabela 5 - Tempos de Reparo: Motores de Compressor

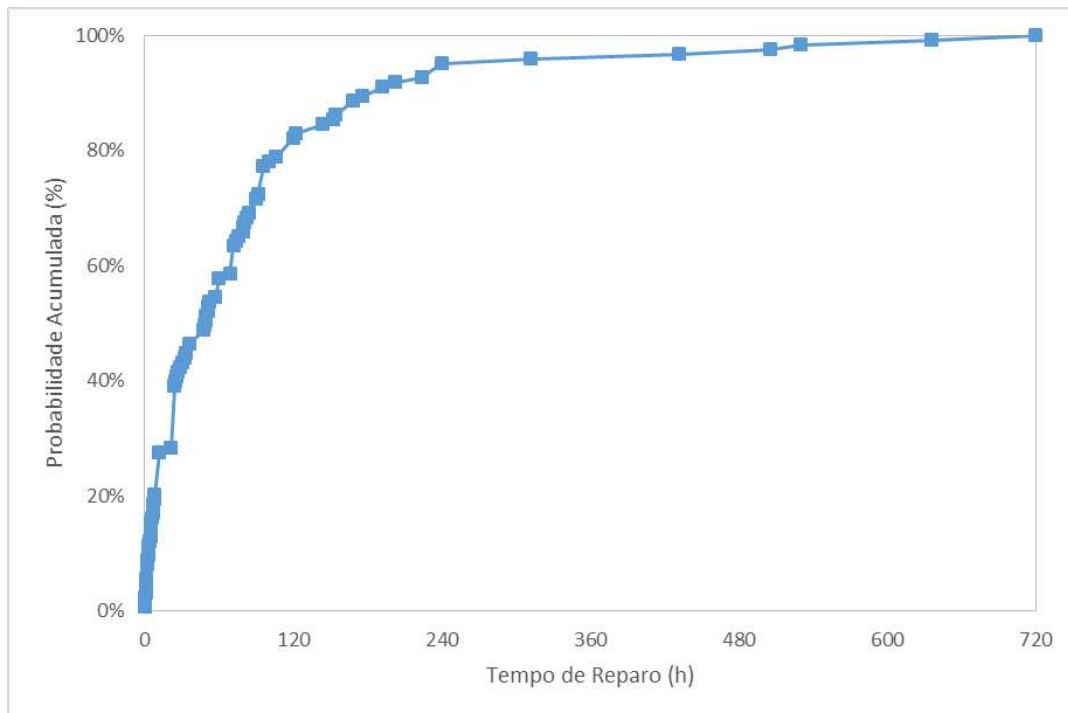
Tempo de Reparo (h)	Prob. Acumulada (%)	Tempo de Reparo (h)	Prob. Acumulada (%)	Tempo de Reparo (h)	Prob. Acumulada (%)	
0,12	1%	5,49	15%	21,50	28%	
0,58	2%	5,50	15%	24,00	39%	
0,72	2%	6,00	16%	24,00		
0,92	3%	6,50	17%	24,00		
1,00	5%	7,00	19%	24,00		
1,00						
1,72	6%	7,50	20%	24,00		
2,00	8%	7,89	20%	24,00		
2,00		28%	12,00	41%		
2,00						
2,50	9%					
2,77	10%					
3,00	11%		12,00			
3,00						
4,50	12%		12,00		25,32	40%
4,91	13%		12,00		25,67	41%
5,00	14%		12,00		27,18	41%

Tempo de Reparo (h)	Prob. Acumulada (%)	Tempo de Reparo (h)	Prob. Acumulada (%)	Tempo de Reparo (h)	Prob. Acumulada (%)
29,00	42%	72,00		120,00	
31,00	43%	72,00		120,00	
32,00	44%	72,00		122,00	83%
33,17	45%	74,42	64%	144,00	85%
36,00	46%	76,00	65%	144,00	85%
36,00		79,50	66%	152,00	86%
48,00	49%	80,00	67%	154,50	86%
48,00		81,00	67%	168,00	89%
48,00		82,00	68%	168,00	
48,50	50%	84,00	69%	168,00	89%
48,99	50%	90,26	72%	176,00	89%
49,00	51%	90,26		192,00	91%
51,00	52%	90,26		192,00	
51,17	53%	91,50	72%	202,50	92%
52,00	54%	96,00	77%	223,95	93%
57,00	54%	96,00		240,00	95%
60,00	58%	96,00		240,00	
60,00		96,00		240,00	
60,00		96,00		312,00	96%
68,80	59%	100,00	78%	432,00	97%
72,00	63%	106,50	79%	505,00	98%
72,00		120,00	82%	530,00	98%
72,00		120,00		636,00	99%
				720,00	100%

A análise dos resultados obtidos para os tempos de reparo dos motores de compressor destaca-se que a probabilidade do reparo durar:

- Até 12 horas é de 28% e até 24 horas é de aproximadamente 39%;
- 7 dias ou mais é de cerca de 23%.

Além disso, a mediana da distribuição é 49h e o maior tempo de reparo previsto é 720h, ou seja, 30 dias.

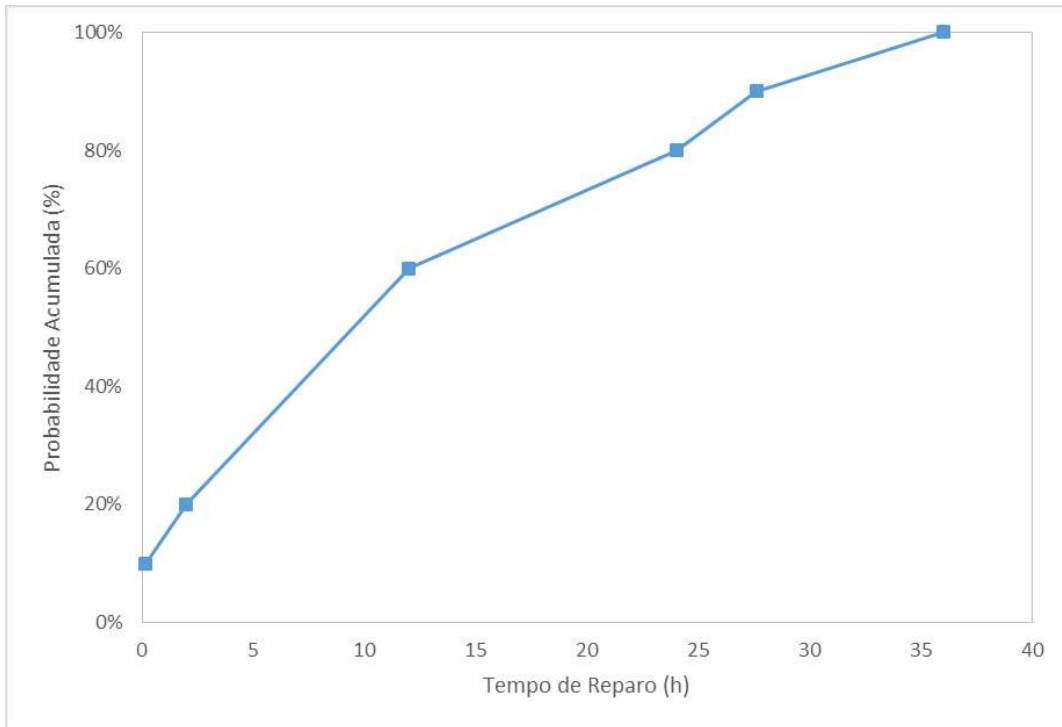


**Figura 15 - CDF dos Tempos de Reparo: Motores de Compressor**

**Tabela 6 - Tempos de Reparo: Vasos**

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada (%)</b>
0,17	10%
2,00	20%
12,00	60%
12,00	
12,00	
12,00	
24,00	80%
24,00	
27,60	90%
36,00	100%

A partir da análise dos resultados obtidos para os tempos de reparo dos vasos destaca-se que a probabilidade do reparo durar até 12 horas é de 60% e até 24 horas é de 80%. Além disso, não são previstos reparos que durem mais de 36h.

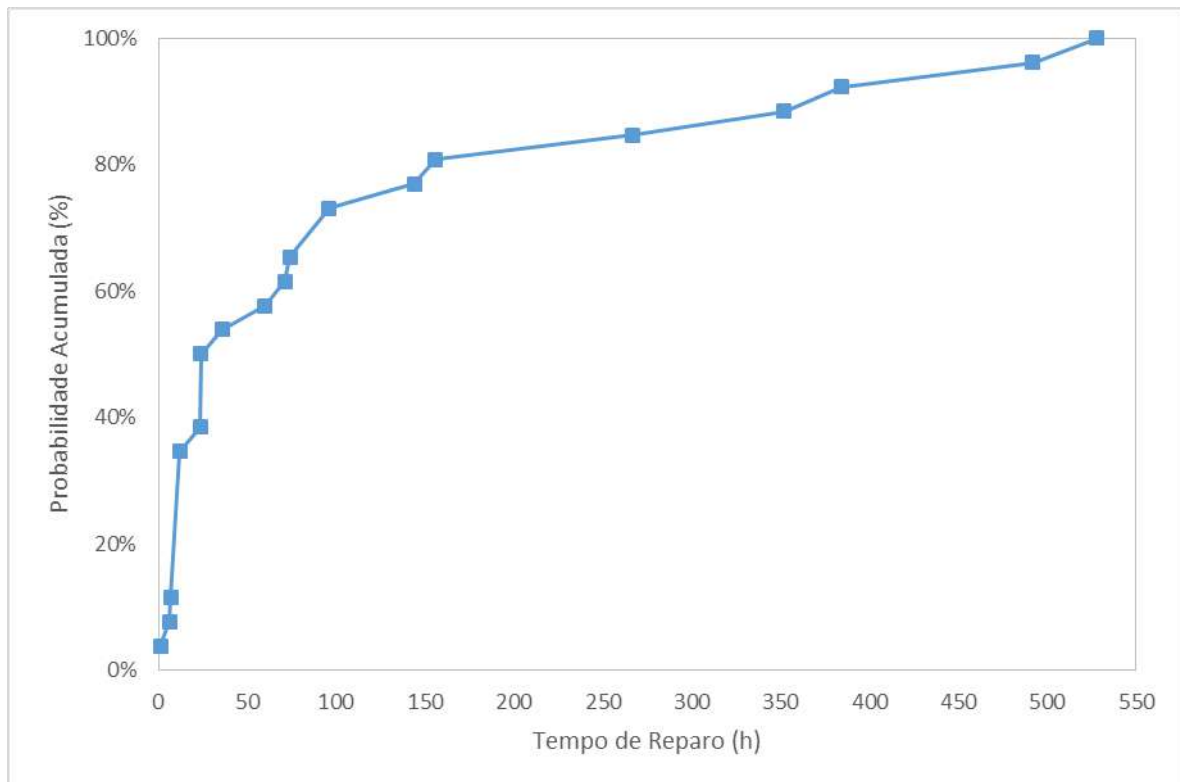


**Figura 16 - CDF dos Tempos de Reparo: Vasos**

**Tabela 7 - Tempos de Reparo: Trocadores de Calor**

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada (%)</b>
1,33	4%
6,33	8%
6,94	12%
12,00	35%
12,00	
12,00	
12,00	
12,00	
12,00	
23,60	38%
24,00	50%
24,00	
24,00	

<b>Tempo de Reparo (h)</b>	<b>Prob. Acumulada (%)</b>
36,00	54%
60,00	58%
71,08	62%
74,00	65%
96,00	73%
96,00	
144,00	77%
156,00	81%
267,00	85%
352,00	88%
384,00	92%
492,00	96%
528,00	100%



**Figura 17 - CDF dos Tempos de Reparo: Trocadores de Calor**

A partir da análise dos resultados obtidos para os tempos de reparo dos trocadores de calor destaca-se que a probabilidade do reparo durar:

- Até 12 horas é de 35% e até 24 horas é de aproximadamente 50%;
- 6 dias ou mais é de cerca de 23%.

Além disso, o maior tempo de reparo previsto é de 528h, ou seja, 22 dias.

## **8.2.2. Determinação dos Parâmetros das Distribuições**

Uma vez definidos os modos de falha para cada categoria de equipamento foram estimados os parâmetros das distribuições exponencial e de Weibull.

### **8.2.2.1. Determinação da Taxa de Falha ( $\lambda$ ) da Distribuição Exponencial**

A determinação da taxa de falha ( $\lambda$ ) para cada modo de falha é realizada simplesmente pela divisão do número de falhas pelo tempo de operação da categoria do equipamento, isto é, a soma dos tempos de operação de todos os equipamentos

similares contemplados no banco de dados. Já o MTTF é calculado tomando-se o inverso da taxa de falha. As taxas de falha para cada categoria de equipamento foram calculadas estando os resultados demonstrados na Tabela 8.

Cabe ressaltar as altas taxas de falha dos compressores e seus motores, 13,4 e 7,1 falhas por ano, respectivamente. Dessa forma, pode-se esperar que estes apresentem o maior número de falhas no Sistema de Ar de Instrumento quando forem realizadas as simulações relativas ao mesmo.

**Tabela 8 - MTTF para as Categorias de Equipamentos**

<b>Categoria de Equipamento</b>	<b>Tempo de Operação (anos)</b>	<b>Núm. de Falhas</b>	<b>Taxa de Falha (falhas/ano)</b>	<b>MTTF (anos)</b>
<b>Motor Compressor</b>	9,0	123	13,4	0,07
<b>Compressor</b>	9,1	65	7,1	0,14
<b>Vaso</b>	61,2	10	0,2	6,12
<b>Trocador de Calor</b>	190,5	26	0,1	7,33

### **8.2.2.2. Determinação dos Parâmetros da Distribuição de Weibull**

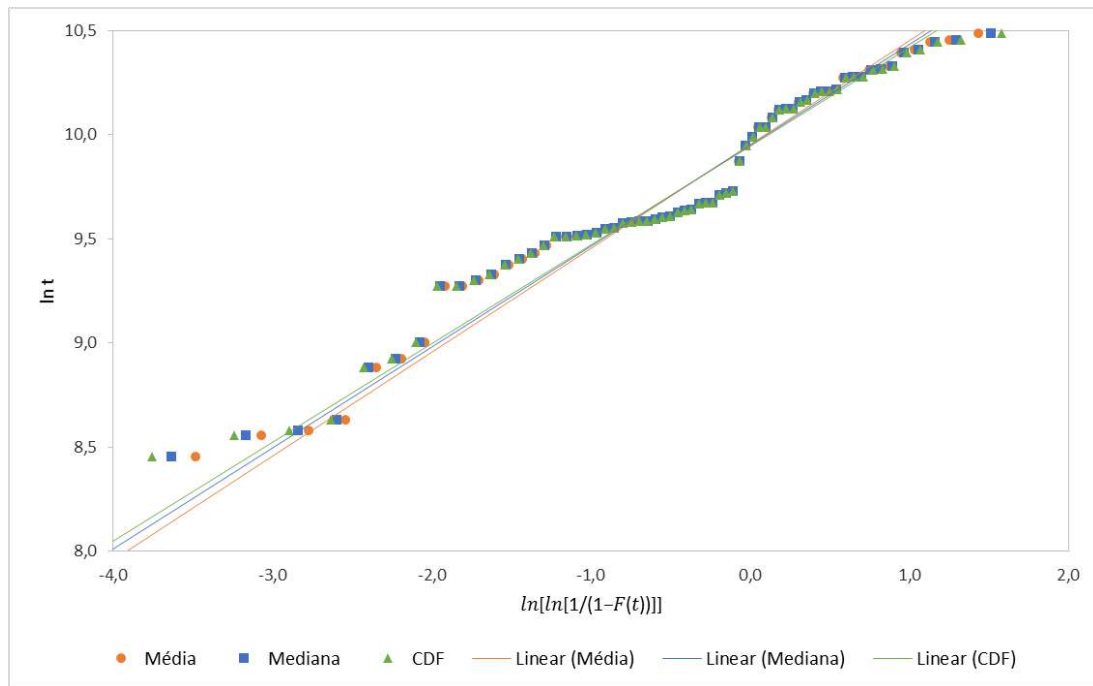
A determinação dos parâmetros de Weibull pode ser feita por diferentes métodos, conforme descrito nos itens 5.3.1 e 5.3.2. Neste trabalho serão comparados os valores estimados dos parâmetros de Weibull pelos métodos gráficos de Probabilidade de Weibull, via classificação por média, mediana e CDF, sendo esses parâmetros estimados pelo procedimento demonstrado no item 5.3.1.1.

Da Tabela 9 à Tabela 16 estão apresentados os valores obtidos após aplicação da equação (31) para os valores de TTF (tempo até falhar) e CDF para os registros de falha de cada categoria de equipamento, bem como o coeficiente de determinação do ajuste dos dados a uma reta. Além disso, da Figura 18 à Figura 21 estão apresentados os gráficos da linearização para as categorias de equipamento, bem como a reta que melhor ajusta os dados.

Tabela 9 – Linearização - Compressores

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-4,182	-4,532	-4,864	6,704
-3,481	-3,637	-3,757	8,456
-3,068	-3,166	-3,239	8,558
-2,772	-2,843	-2,894	8,581
-2,541	-2,596	-2,635	8,629
-2,351	-2,395	-2,426	8,882
-2,188	-2,225	-2,250	8,924
-2,046	-2,077	-2,099	9,004
-1,920	-1,947	-1,965	9,272
-1,806	-1,829	-1,845	9,272
-1,702	-1,722	-1,736	9,301
-1,606	-1,624	-1,636	9,329
-1,517	-1,533	-1,544	9,377
-1,434	-1,448	-1,458	9,403
-1,355	-1,368	-1,377	9,432
-1,281	-1,293	-1,300	9,468
-1,211	-1,221	-1,228	9,510
-1,144	-1,153	-1,159	9,511
-1,080	-1,088	-1,094	9,513
-1,019	-1,026	-1,031	9,520
-0,960	-0,966	-0,970	9,529
-0,903	-0,908	-0,912	9,546
-0,848	-0,853	-0,856	9,551
-0,794	-0,798	-0,801	9,573
-0,742	-0,746	-0,748	9,582
-0,692	-0,695	-0,697	9,583
-0,642	-0,645	-0,647	9,585
-0,594	-0,596	-0,598	9,592
-0,547	-0,549	-0,550	9,605
-0,501	-0,502	-0,503	9,608
-0,455	-0,456	-0,457	9,625
-0,411	-0,411	-0,411	9,636
-0,367	-0,367	-0,367	9,638

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-0,323	-0,323	-0,322	9,669
-0,280	-0,279	-0,279	9,673
-0,238	-0,237	-0,236	9,675
-0,196	-0,194	-0,193	9,710
-0,154	-0,152	-0,151	9,719
-0,112	-0,110	-0,108	9,728
-0,071	-0,068	-0,066	9,871
-0,030	-0,027	-0,025	9,948
0,012	0,015	0,017	9,990
0,053	0,057	0,059	10,038
0,094	0,098	0,101	10,038
0,136	0,140	0,143	10,083
0,177	0,182	0,186	10,120
0,219	0,225	0,228	10,123
0,262	0,268	0,272	10,125
0,305	0,311	0,316	10,158
0,349	0,355	0,360	10,164
0,393	0,401	0,406	10,197
0,439	0,447	0,452	10,209
0,485	0,494	0,500	10,209
0,533	0,543	0,549	10,219
0,583	0,593	0,600	10,275
0,635	0,646	0,654	10,276
0,689	0,702	0,710	10,278
0,747	0,760	0,770	10,311
0,808	0,823	0,834	10,315
0,875	0,892	0,904	10,329
0,948	0,968	0,982	10,392
1,031	1,055	1,072	10,406
1,129	1,159	1,181	10,446
1,252	1,295	1,327	10,452
1,433	1,512	1,583	10,485



**Figura 18 - Linearização – Compressores**

**Tabela 10 - Parâmetros da Distribuição de Weibull - Compressores**

Parâmetro	Média	Mediana	CDF
$\beta$	2,004	2,063	2,111
$\eta$ (anos)	2,397	2,390	2,385
$R^2$	0,914	0,925	0,935

Os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull obtidos pelos três métodos foram bem próximos, demonstrando uma boa aderência dos mesmos quando há grande número de registros. Além disso, verifica-se pelo coeficiente de determinação que o ajuste dos valores de TTF e CDF linearizados é apenas razoável. No entanto, para as finalidades deste estudo, estes valores foram considerados satisfatórios principalmente tendo em vista as incertezas relacionadas ao registro de falhas em bancos de dados.

**Tabela 11 - Linearização - Motores de Compressor**

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-4,816	-5,169	-5,503	6,892
-4,119	-4,278	-4,401	7,289
-3,709	-3,811	-3,886	7,841

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-3,418	-3,492	-3,545	7,869
-3,190	-3,249	-3,290	7,905
-3,004	-3,051	-3,085	8,134

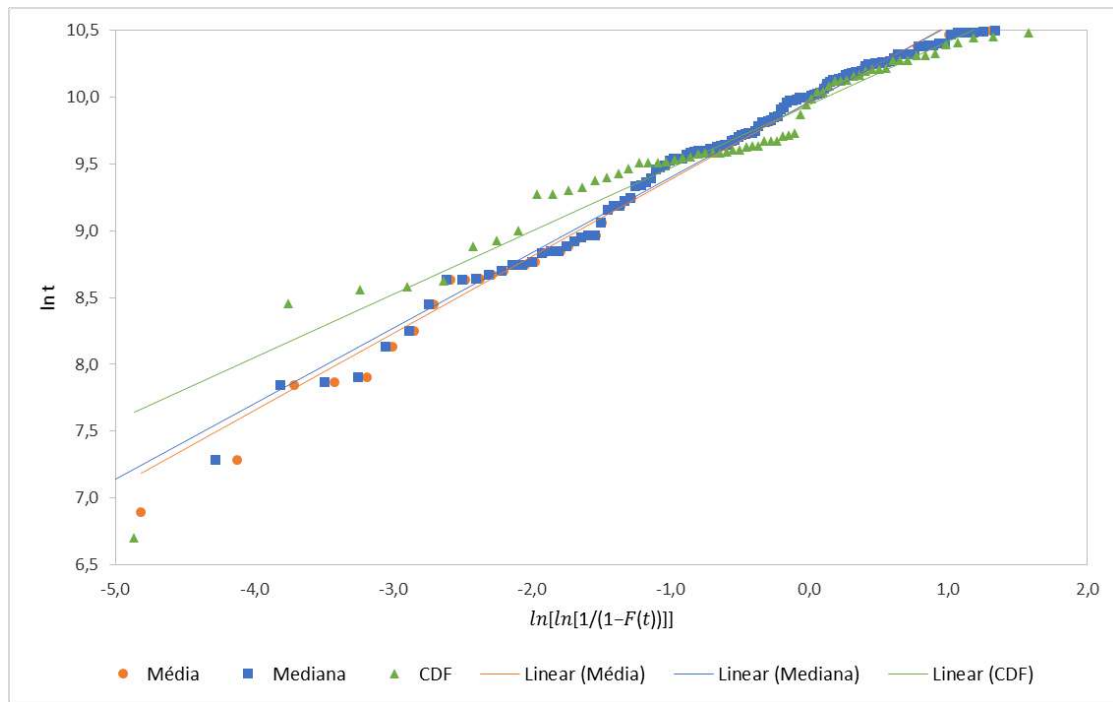


ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-2,845	-2,886	-2,913	8,247
-2,708	-2,742	-2,766	8,446
-2,586	-2,616	-2,637	8,633
-2,476	-2,503	-2,521	8,633
-2,376	-2,400	-2,417	8,638
-2,285	-2,306	-2,321	8,671
-2,200	-2,220	-2,233	8,700
-2,122	-2,140	-2,152	8,743
-2,048	-2,065	-2,076	8,746
-1,979	-1,995	-2,005	8,769
-1,914	-1,928	-1,938	8,834
-1,853	-1,865	-1,874	8,844
-1,794	-1,806	-1,814	8,844
-1,738	-1,749	-1,757	8,882
-1,684	-1,695	-1,702	8,921
-1,633	-1,643	-1,650	8,949
-1,584	-1,593	-1,599	8,965
-1,537	-1,545	-1,551	8,968
-1,491	-1,499	-1,505	9,059
-1,447	-1,454	-1,460	9,159
-1,404	-1,411	-1,416	9,189
-1,363	-1,370	-1,374	9,189
-1,323	-1,329	-1,333	9,221
-1,284	-1,290	-1,294	9,242
-1,246	-1,252	-1,255	9,335
-1,209	-1,214	-1,218	9,339
-1,173	-1,178	-1,181	9,364
-1,138	-1,143	-1,146	9,395
-1,104	-1,108	-1,111	9,460
-1,070	-1,074	-1,077	9,471
-1,037	-1,041	-1,044	9,490
-1,005	-1,009	-1,012	9,522
-0,974	-0,977	-0,980	9,538
-0,943	-0,946	-0,948	9,538
-0,913	-0,916	-0,918	9,541
-0,883	-0,886	-0,888	9,567
-0,854	-0,856	-0,858	9,582
-0,825	-0,827	-0,829	9,592

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-0,797	-0,799	-0,801	9,601
-0,769	-0,771	-0,772	9,601
-0,741	-0,743	-0,745	9,601
-0,714	-0,716	-0,717	9,609
-0,688	-0,689	-0,690	9,613
-0,661	-0,663	-0,664	9,625
-0,635	-0,637	-0,638	9,632
-0,610	-0,611	-0,612	9,640
-0,584	-0,585	-0,586	9,646
-0,559	-0,560	-0,561	9,670
-0,534	-0,535	-0,536	9,676
-0,510	-0,510	-0,511	9,705
-0,485	-0,486	-0,486	9,715
-0,461	-0,462	-0,462	9,722
-0,437	-0,437	-0,438	9,731
-0,413	-0,414	-0,414	9,732
-0,390	-0,390	-0,390	9,749
-0,367	-0,367	-0,367	9,781
-0,343	-0,343	-0,343	9,814
-0,320	-0,320	-0,320	9,815
-0,297	-0,297	-0,297	9,821
-0,275	-0,274	-0,274	9,823
-0,252	-0,251	-0,251	9,845
-0,230	-0,229	-0,228	9,858
-0,207	-0,206	-0,206	9,908
-0,185	-0,184	-0,183	9,922
-0,163	-0,162	-0,161	9,956
-0,140	-0,139	-0,139	9,974
-0,118	-0,117	-0,116	9,977
-0,096	-0,095	-0,094	9,983
-0,074	-0,073	-0,072	9,994
-0,052	-0,051	-0,050	9,997
-0,030	-0,029	-0,028	9,998
-0,008	-0,007	-0,006	9,999
0,014	0,015	0,017	10,014
0,035	0,037	0,039	10,018
0,057	0,059	0,061	10,023
0,079	0,082	0,083	10,031

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
0,101	0,104	0,105	10,063
0,123	0,126	0,127	10,097
0,146	0,148	0,150	10,117
0,168	0,170	0,172	10,125
0,190	0,193	0,195	10,131
0,212	0,215	0,217	10,133
0,235	0,238	0,240	10,146
0,258	0,261	0,263	10,164
0,280	0,284	0,286	10,175
0,303	0,307	0,309	10,177
0,327	0,330	0,333	10,187
0,350	0,354	0,356	10,187
0,374	0,377	0,380	10,192
0,397	0,401	0,404	10,234
0,422	0,426	0,429	10,246
0,446	0,450	0,453	10,246
0,471	0,475	0,478	10,257
0,496	0,501	0,504	10,257
0,522	0,527	0,530	10,261
0,548	0,553	0,556	10,261
0,574	0,580	0,583	10,265

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
0,601	0,607	0,611	10,289
0,629	0,635	0,639	10,318
0,657	0,664	0,668	10,319
0,687	0,693	0,698	10,319
0,717	0,724	0,728	10,319
0,748	0,755	0,760	10,319
0,780	0,788	0,793	10,378
0,813	0,821	0,827	10,380
0,848	0,857	0,863	10,386
0,885	0,894	0,900	10,389
0,923	0,933	0,940	10,404
0,964	0,975	0,983	10,404
1,008	1,020	1,029	10,469
1,056	1,069	1,079	10,481
1,108	1,123	1,134	10,481
1,167	1,184	1,196	10,483
1,234	1,255	1,270	10,492
1,314	1,341	1,360	10,495
1,418	1,455	1,483	10,511
1,573	1,643	1,706	10,518



**Figura 19 - Linearização – Motores de Compressor**

**Tabela 12 - Parâmetros da Distribuição de Weibull - Motores Compressor**

Parâmetro	Média	Mediana	CDF
$\beta$	1,733	1,771	1,803
$\eta$ (anos)	2,434	2,426	2,419
$R^2$	0,983	0,985	0,985

Os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull obtidos pelos três métodos foram bem próximos, demonstrando novamente uma boa aderência dos mesmos quando há grande número de registros. No entanto, diferentemente do caso dos compressores, os dados dos motores apresentaram coeficiente de determinação satisfatório.

**Tabela 13 - Linearização - Vasos**

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-2,351	-2,664	-2,970	9,123
-1,606	-1,723	-1,817	9,360
-1,144	-1,202	-1,246	9,455
-0,794	-0,822	-0,842	9,882
-0,501	-0,509	-0,514	9,909

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-0,238	-0,230	-0,225	10,053
0,012	0,033	0,049	10,066
0,262	0,299	0,327	10,195
0,533	0,594	0,640	10,462
0,875	0,993	1,097	10,489

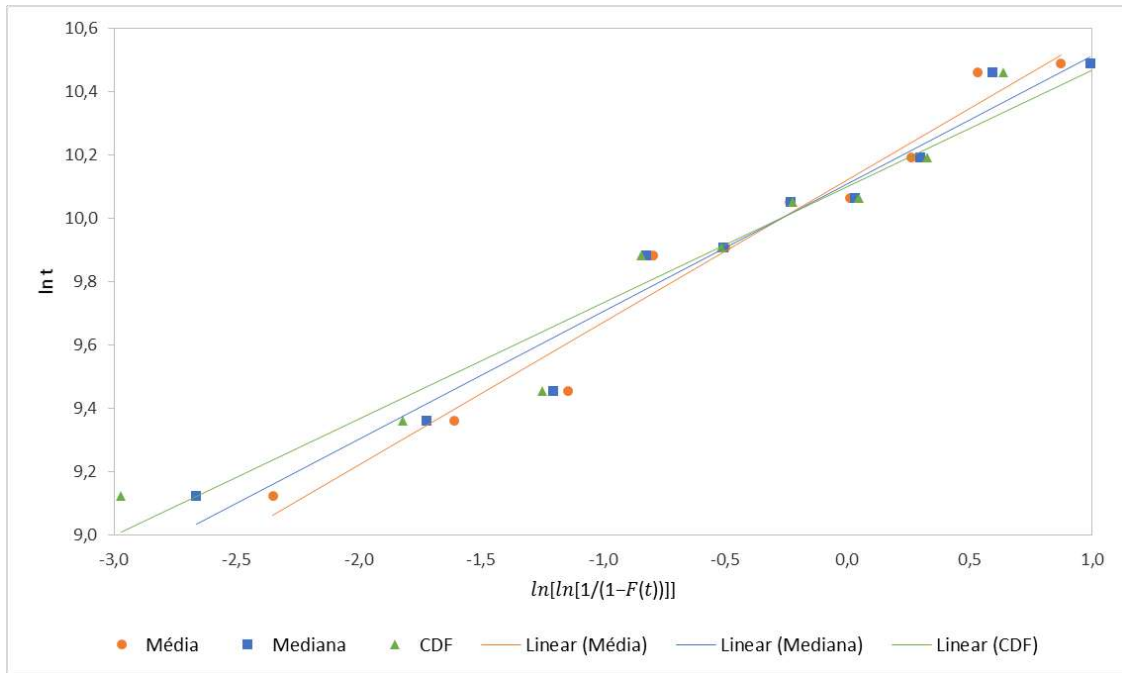


Figura 20 - Linearização – Vasos

Tabela 14 - Parâmetros da Distribuição de Weibull - Vasos

Parâmetro	Média	Mediana	CDF
$\beta$	2,218	2,476	2,720
$\eta$ (anos)	2,843	2,809	2,784
$R^2$	0,968	0,963	0,956

Para os vasos, os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull obtidos foram próximos para  $\eta$ , porém bem diferentes para  $\beta$ . Dessa forma, é demonstrado que a aderência, principalmente quanto ao fator de forma, fica comprometida quando há um pequeno número de registros. Além disso, verifica-se pelo coeficiente de determinação que o ajuste dos valores de TTF e CDF linearizados é apenas razoável. No entanto, para as finalidades deste estudo, estes valores foram considerados satisfatórios principalmente tendo em vista as incertezas relacionadas ao registro de falhas em bancos de dados.

Tabela 15 - Linearização - Trocadores de Calor

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-3,277	-3,617	-3,942	7,711
-2,564	-2,710	-2,823	8,940
-2,139	-2,227	-2,292	8,998
-1,830	-1,890	-1,934	9,206
-1,586	-1,629	-1,661	9,258
-1,381	-1,414	-1,437	9,309
-1,204	-1,228	-1,246	9,510
-1,046	-1,065	-1,078	9,534
-0,903	-0,917	-0,927	9,716
-0,771	-0,781	-0,788	10,012
-0,648	-0,654	-0,659	10,014
-0,531	-0,535	-0,538	10,020
-0,420	-0,422	-0,422	10,050

ln [ln[1/(1-F(t))]]			ln t
Média	Mediana	CDF	
-0,313	-0,312	-0,311	10,093
-0,210	-0,206	-0,204	10,097
-0,108	-0,102	-0,098	10,098
-0,007	0,001	0,007	10,104
0,094	0,104	0,112	10,105
0,196	0,209	0,218	10,119
0,300	0,316	0,327	10,213
0,408	0,427	0,440	10,225
0,523	0,546	0,562	10,288
0,647	0,676	0,696	10,325
0,787	0,824	0,851	10,325
0,957	1,009	1,048	10,423
1,193	1,289	1,374	10,502

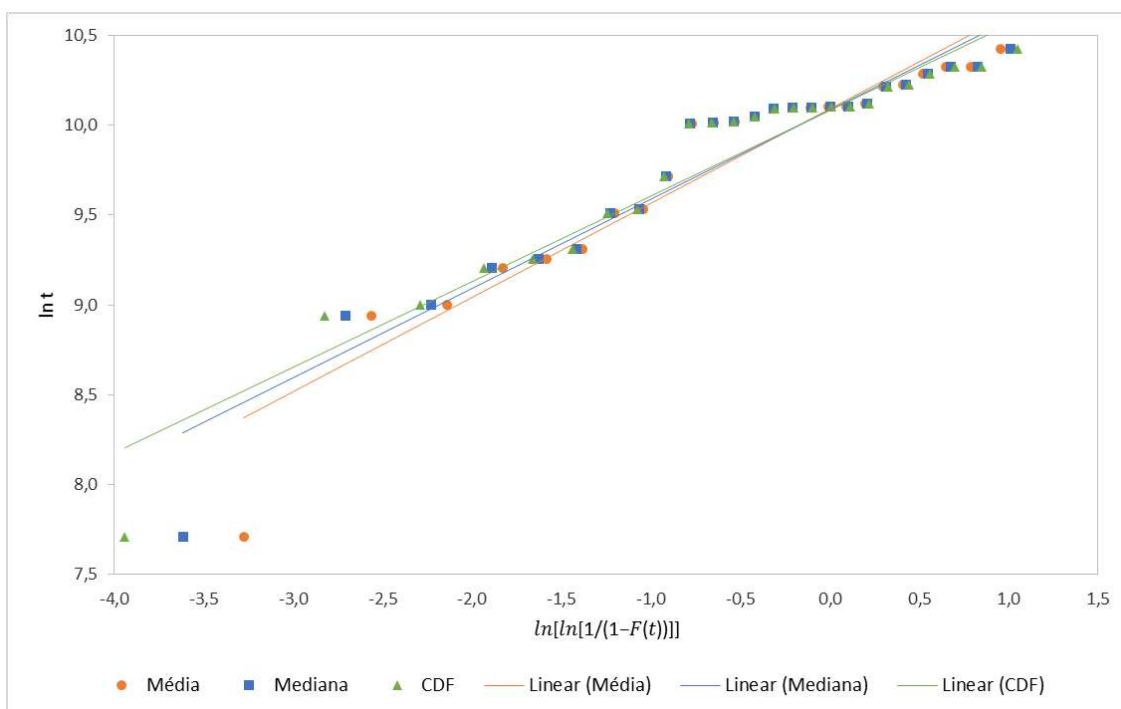


Figura 21 - Linearização - Trocadores de Calor

**Tabela 16 - Parâmetros da Distribuição de Weibull – Trocadores de Calor**

<b>Parâmetro</b>	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>CDF</b>
<b><math>\beta</math></b>	1,902	2,008	2,100
<b><math>\eta</math> (anos)</b>	2,765	2,749	2,737
<b>R<sup>2</sup></b>	0,903	0,916	0,927

Por fim, os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull obtidos para os trocadores de calor foram próximos para  $\eta$ , porém bastante distintos para  $\beta$ . Dessa forma, corrobora-se a tendência de perda de aderência nos resultados do fator de forma, quando há pequeno número de registros. Além disso, verifica-se pelo coeficiente de determinação que o ajuste dos valores de TTF e CDF linearizados é apenas razoável. No entanto, conforme explicitado anteriormente, para as finalidades deste estudo, estes valores foram considerados satisfatórios.

Os valores obtidos para os parâmetros de Weibull mostrados nesta seção estão resumidos na Tabela 17.

**Tabela 17 - Resumo dos Parâmetros de Weibull Estimados**

<b>Categoria de Equipamento</b>	<b>Método</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>\eta</math> (anos)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>Compressores</b>	<b>Média</b>	2,004	2,397	0,914
	<b>Mediana</b>	2,063	2,390	0,925
	<b>CDF</b>	2,111	2,385	0,935
<b>Motores Compressor</b>	<b>Média</b>	1,733	2,434	0,983
	<b>Mediana</b>	1,771	2,426	0,985
	<b>CDF</b>	1,803	2,419	0,985
<b>Vasos</b>	<b>Média</b>	2,218	2,843	0,968
	<b>Mediana</b>	2,476	2,809	0,963
	<b>CDF</b>	2,720	2,784	0,956
<b>Trocadores de Calor</b>	<b>Média</b>	1,902	2,765	0,903
	<b>Mediana</b>	2,008	2,749	0,916
	<b>CDF</b>	2,100	2,737	0,927

## 9. Resultados e Discussão

As simulações referentes aos casos descritos no item 8.1 foram realizadas no software MAROS da DNV visando avaliar, principalmente, a eficiência produtiva média do sistema de ar de instrumentos e o número médio de falhas de cada equipamento para ciclos de vida futura de 10, 20 e 50 anos. Dessa forma, é possível prever a tendência futura da confiabilidade desses sistema, cujo diagrama de blocos de confiabilidade está mostrado na Figura 12.

Posteriormente, estão apresentadas comparações entre os resultados obtidos considerando falhas distribuídas exponencialmente e pela distribuição de Weibull.

### 9.1. Casos de Distribuição Exponencial

Foram simulados três casos, relativos aos diferentes tempos de vida futura, utilizando dados de falha seguindo distribuição exponencial, isto é, taxa de falha constante. Os dados utilizados para as simulações estão apresentados no Capítulo 8 deste trabalho.

A Tabela 18 apresenta os resultados de eficiência produtiva média e desvio padrão das simulações de 250 ciclos de 10, 20 e 50 anos de tempo de vida para o Sistema de Ar de Instrumentos. Além disso, são demonstradas as variações de eficiência produtiva em relação ao caso de tempo de vida de 10 anos e a faixa mais provável de eficiência produtiva, considerando o intervalo da média mais/menos um desvio padrão.

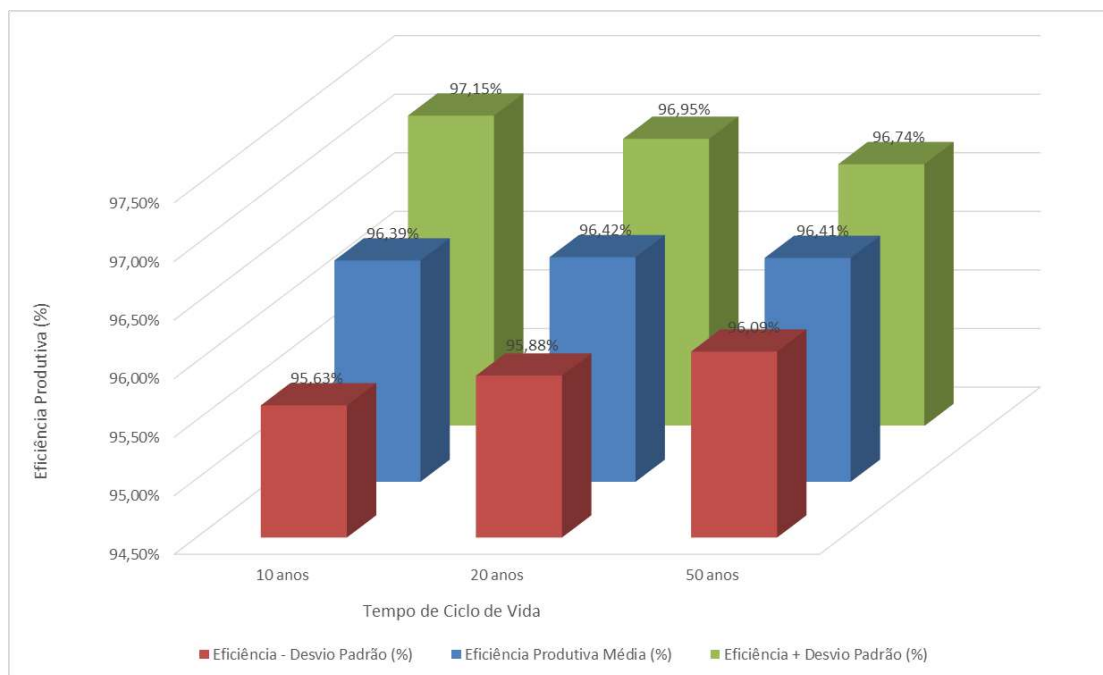
**Tabela 18 - Resultados de Eficiência Produtiva - Casos de Distribuição Exponencial**

<b>Caso</b>	<b>Eficiência Produtiva Média (%)</b>	<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b><math>\Delta</math> Eficiência Produtiva Média (%)</b>	<b>Eficiência - Desvio Padrão (%)</b>	<b>Eficiência + Desvio Padrão (%)</b>
10 anos	96,39%	0,76%	-	95,63%	97,15%
20 anos	96,42%	0,54%	+ 0,03%	95,88%	96,95%
50 anos	96,41%	0,32%	+ 0,02%	96,09%	96,74%

A análise desses resultados revela que as variações de eficiência produtiva média foram muito pequenas, da ordem de centésimos percentuais, conforme esperado, já

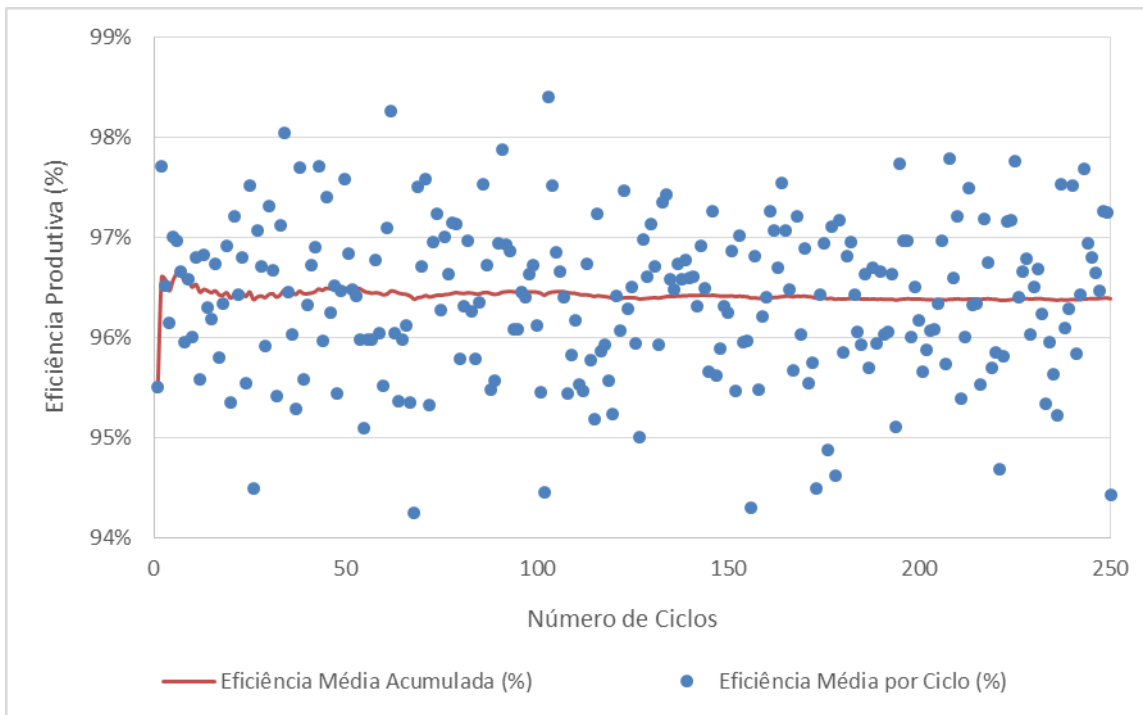
que foram usadas taxas de falha constantes no tempo. Cabe ressaltar que a pequena, porém existente, variação de eficiência produtiva era esperada e é decorrente do sorteio aleatório de eventos realizado pelo *software*, sendo esta diferença, no entanto, pequena frente ao desvio padrão. Os resultados da Tabela 18 estão apresentados de forma gráfica na Figura 22.

A fim de verificar a dispersão das eficiências médias por ciclo, estão apresentados na Figura 23 os valores de eficiência produtiva média (pontos) obtidos em cada ciclo de simulação e a média acumulada dos mesmos (linha) para o caso exponencial com tempo de vida de 10 anos. Pela análise do gráfico, nota-se que a dispersão de valores de eficiência obtida esteve contida entre 98,4% e 94,3%, aproximadamente, e que a convergência da média acumulada de eficiência produtiva média foi alcançada em cerca de 150 ciclos.



**Figura 22 - Eficiência Produtiva Média +/- 1 Desvio Padrão - Casos de Distribuição Exponencial**



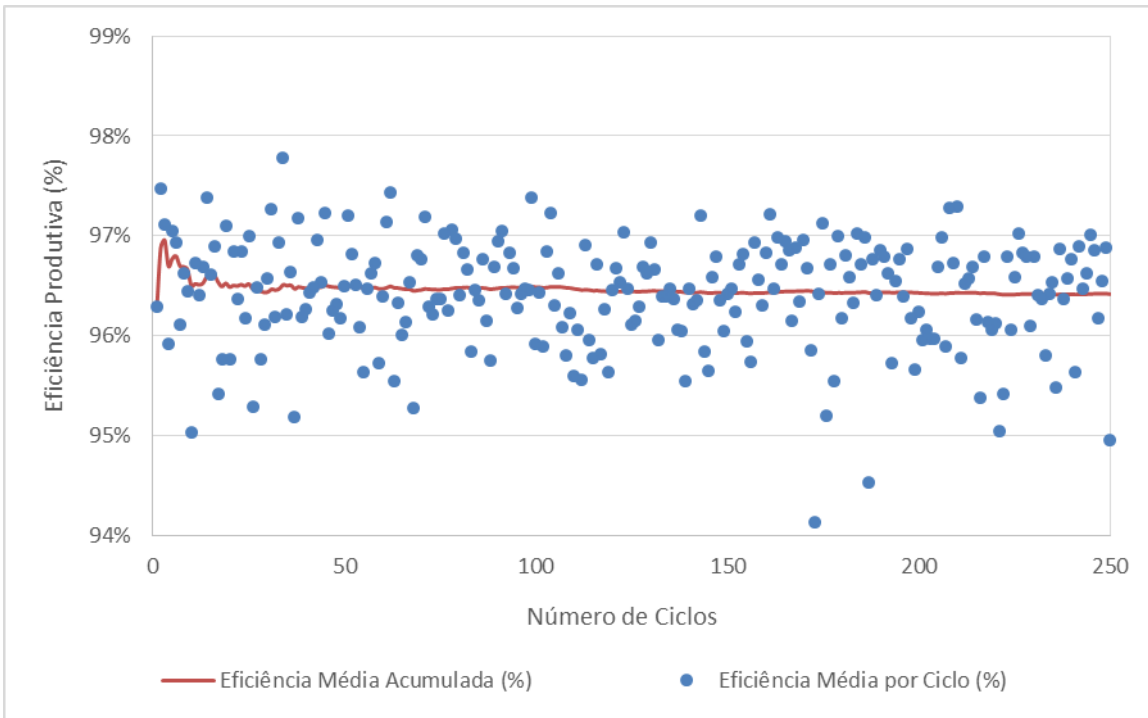


**Figura 23 - Eficiência Produtiva Média por Ciclo e Acumulada - 10 anos**

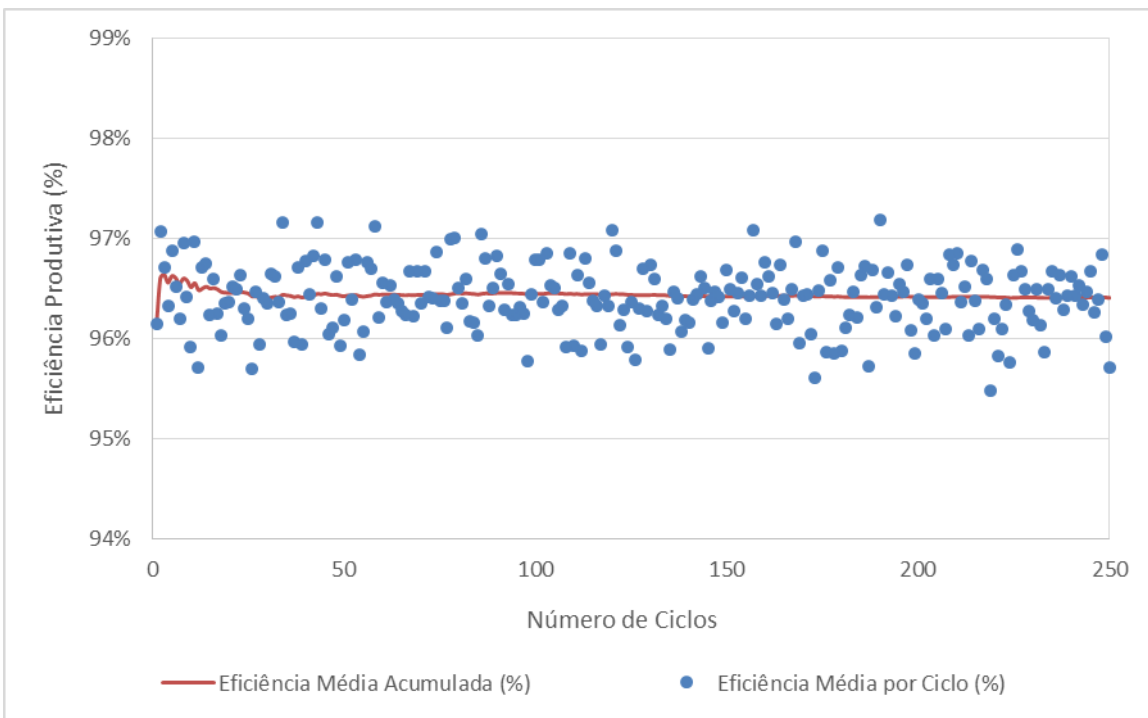
A Figura 24 demonstra os valores de eficiência produtiva média obtidos em cada ciclo de simulação e a média acumulada dos mesmos para o caso exponencial com tempo de vida de 20 anos. Por inspeção, percebe-se que a dispersão de valores de eficiência obtida esteve contida entre 97,8% e 94,1%, aproximadamente, e que a convergência da média acumulada de eficiência produtiva média foi alcançada em cerca de 100 ciclos. Dessa forma, conclui-se que o modelo simulando 20 anos possui distribuição de eficiência por ciclo mais próxima da média, fato corroborado pelo menor desvio padrão apresentado por este modelo em comparação com o anterior.

Pela Figura 25, referente à simulação de ciclos de vida futura de 50 anos, nota-se que a dispersão de valores de eficiência obtida esteve contida entre 97,2% e 95,5%, aproximadamente, e que a convergência da média acumulada de eficiência produtiva média foi alcançada em menos de 50 ciclos. Portanto, esta simulação é a que apresenta distribuição mais próxima da média, fato corroborado pelo menor valor de desvio padrão obtido para a mesma dentre as três supracitadas.

Os maiores contribuintes para as perdas de eficiência produtiva aferidas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 19.



**Figura 24 - Eficiência Produtiva Média por Ciclo e Acumulada - 20 anos**



**Figura 25 - Eficiência Produtiva Média por Ciclo e Acumulada - 50 anos**

**Tabela 19 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição Exponencial**

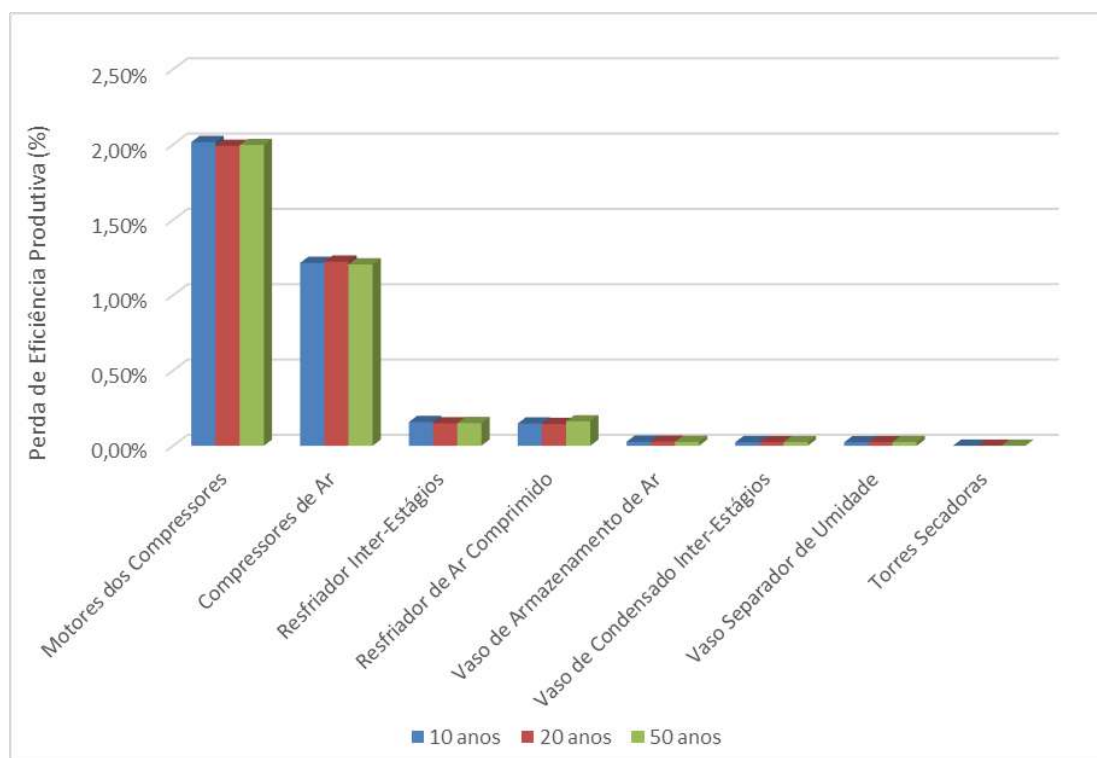
Categoria de Equipamento	Perda de Eficiência Produtiva (%)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Motores dos Compressores	2,02%	1,99%	2,00%
Compressores de Ar	1,21%	1,22%	1,20%
Resfriador Inter-Estágios	0,16%	0,15%	0,15%
Resfriador de Ar Comprimido	0,15%	0,14%	0,16%
Vaso de Armazenamento de Ar	0,03%	0,03%	0,03%
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,02%	0,02%	0,02%
Vaso Separador de Umidade	0,02%	0,02%	0,03%
Torres Secadoras	0,00%	0,00%	0,00%

Nota-se claramente que, apesar do arranjo 2x100% dos motores e compressores, os mesmos são os principais contribuintes para perdas de eficiência produtiva do sistema. Esse fato é justificado pelo pequeno MTTF de cada um deles, conforme apresentado na Tabela 8, e pela razoável probabilidade de possuir tempos de reparo elevados, como discutido anteriormente, fatos que aumentam as chances de falhas simultâneas desses equipamentos. Os resultados da Tabela 19 estão apresentados de forma gráfica na Figura 26.

Cabe ressaltar que as perdas de eficiência produtiva verificadas acima são oriundas de falhas de equipamentos do Sistema de Ar de Instrumentos. Dessa forma, é importante analisar:

- O número médio de eventos de falha, sendo que a grande maioria destes não leva a paradas e;
- O número médio de paradas da unidade, que necessariamente levarão a perdas de produção.

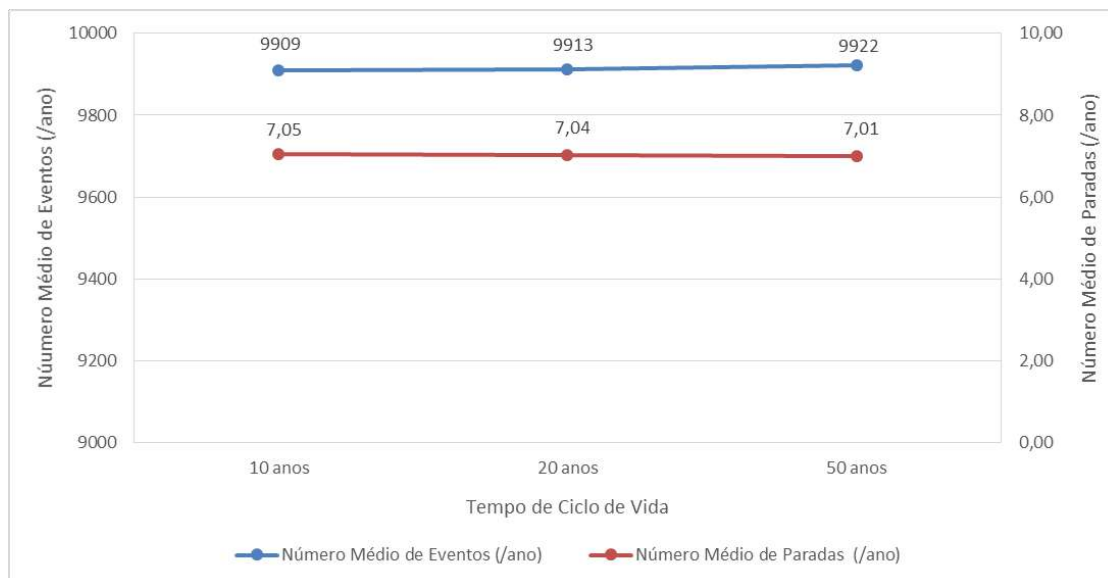
Esses resultados, bem como a comparação em base percentual com aqueles do modelo para 10 anos, estão apresentados na Tabela 20 e Figura 27.



**Figura 26 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição Exponencial**

**Tabela 20 – Média de Paradas e Eventos por Caso de Distribuição Exponencial**

<b>Caso</b>	<b>Número Médio de Paradas (/ano)</b>	<b>Δ Número Médio de Paradas (%)</b>	<b>Número Médio de Eventos (/ano)</b>	<b>Δ Número de Eventos (%)</b>
10 anos	7,05	-	9909	-
20 anos	7,04	- 0,21%	9913	+ 0,04%
50 anos	7,01	- 0,64%	9922	+ 0,13%



**Figura 27 - Média de Paradas e Eventos por Caso de Distribuição Exponencial**

Os maiores contribuintes para falhas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição Exponencial**

Categoria de Equipamento	Média de Falhas (falhas/ano)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Motores dos Compressores	25,19	25,23	25,27
Compressores de Ar	13,32	13,33	13,34
Torres Secadoras	0,30	0,30	0,31
Vaso de Armazenamento de Ar	0,16	0,17	0,16
Vaso Separador de Umidade	0,15	0,16	0,16
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,15	0,15	0,16
Resfriador Inter-Estágios	0,14	0,13	0,13
Resfriador de Ar Comprimido	0,13	0,13	0,14

Conforme previsto pelo elevado impacto na eficiência produtiva, os motores e compressores são os principais contribuintes para falhas do sistema, estando os resultados apresentados de forma gráfica na Figura 28. Esse fato é justificado pelo mesmo motivo apresentado para as perdas de eficiência produtiva. No entanto, é

importante ressaltar a importância da redundância (esquema 2x100%) para esses equipamentos uma vez que, caso não tivesse sido projetada essa redundância, o impacto desses equipamentos na eficiência produtiva seria muito superior.

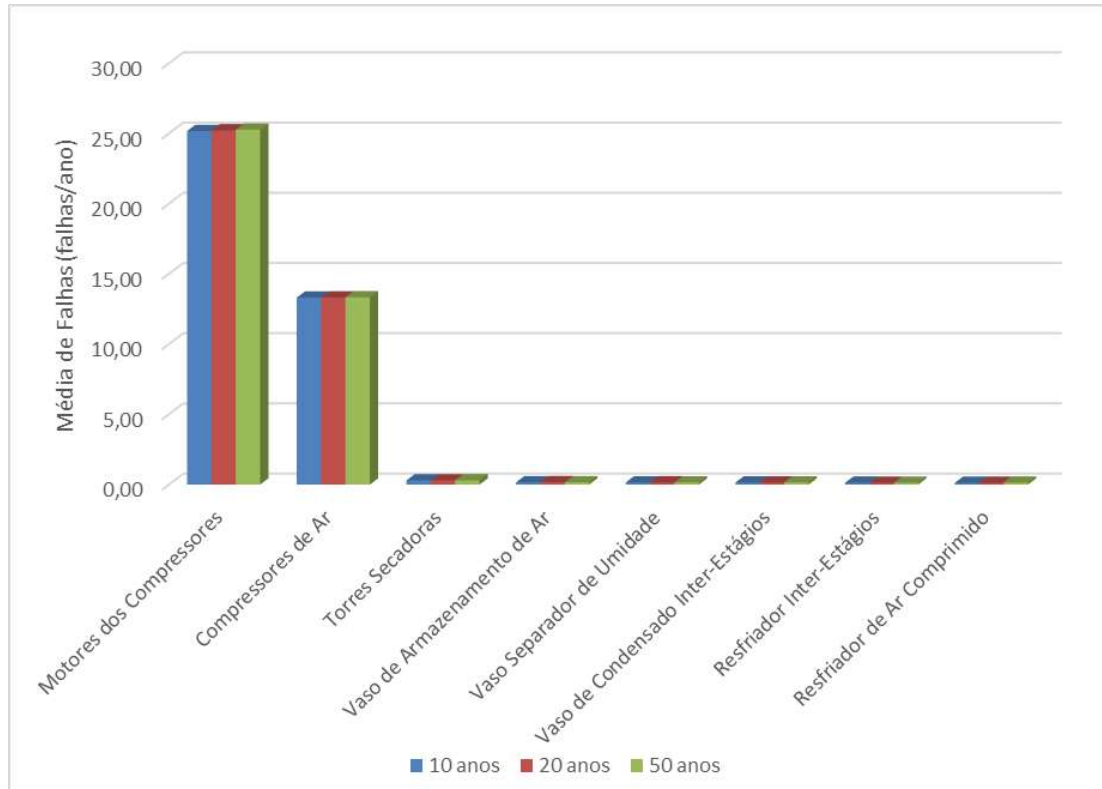


Figura 28 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição Exponencial

## 9.2. Casos de Distribuição de Weibull

### 9.2.1. Método da Média

Foram simulados três casos, relativos aos diferentes tempos de vida futura, utilizando dados de falha seguindo distribuição de Weibull com parâmetros estimados pelo método da média.

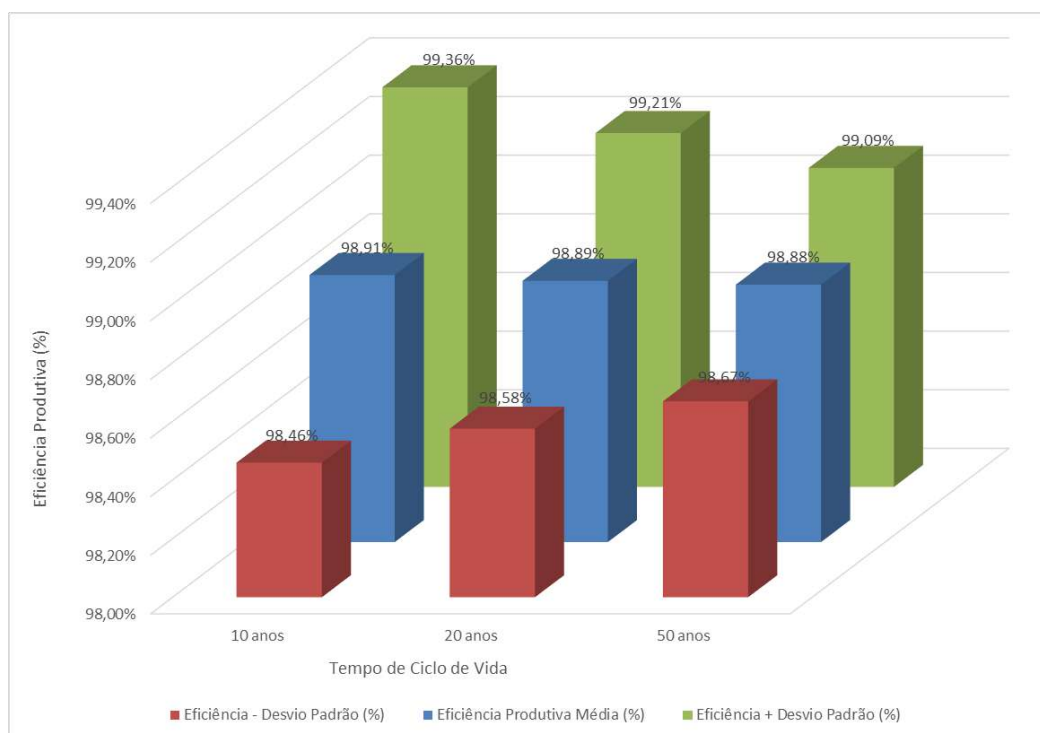
A Tabela 22 apresenta os resultados de eficiência produtiva média e desvio padrão das simulações de 250 ciclos de 10, 20 e 50 anos de tempo de vida para o Sistema de Ar de Instrumentos. Além disso, são demonstradas as variações de eficiência produtiva em relação ao caso de tempo de vida de 10 anos e a faixa mais

provável de eficiência produtiva, considerando o intervalo da média mais/menos um desvio padrão.

**Tabela 22 - Resultados de Eficiência Produtiva - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média**

Caso	Eficiência Produtiva Média (%)	Desvio Padrão (%)	$\Delta$ Eficiência Produtiva Média (%)	Eficiência - Desvio Padrão (%)	Eficiência + Desvio Padrão (%)
10 anos	98,91%	0,45%	-	98,46%	99,36%
20 anos	98,89%	0,32%	-0,02%	98,58%	99,21%
50 anos	98,88%	0,21%	-0,03%	98,67%	99,09%

A análise desses resultados revela que as variações de eficiência produtiva média foram muito pequenas, da ordem de centésimos percentuais. Este comportamento, no entanto, não era esperado, uma vez que foram utilizados dados de falha ajustados para a distribuição de Weibull. Dessa forma, a tendência era de diminuição da eficiência produtiva com o aumento do tempo de ciclo de vida. Os resultados da Tabela 18 estão apresentados de forma gráfica na Figura 29.



**Figura 29 - Eficiência Produtiva Média +- 1 Desvio Padrão - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média**

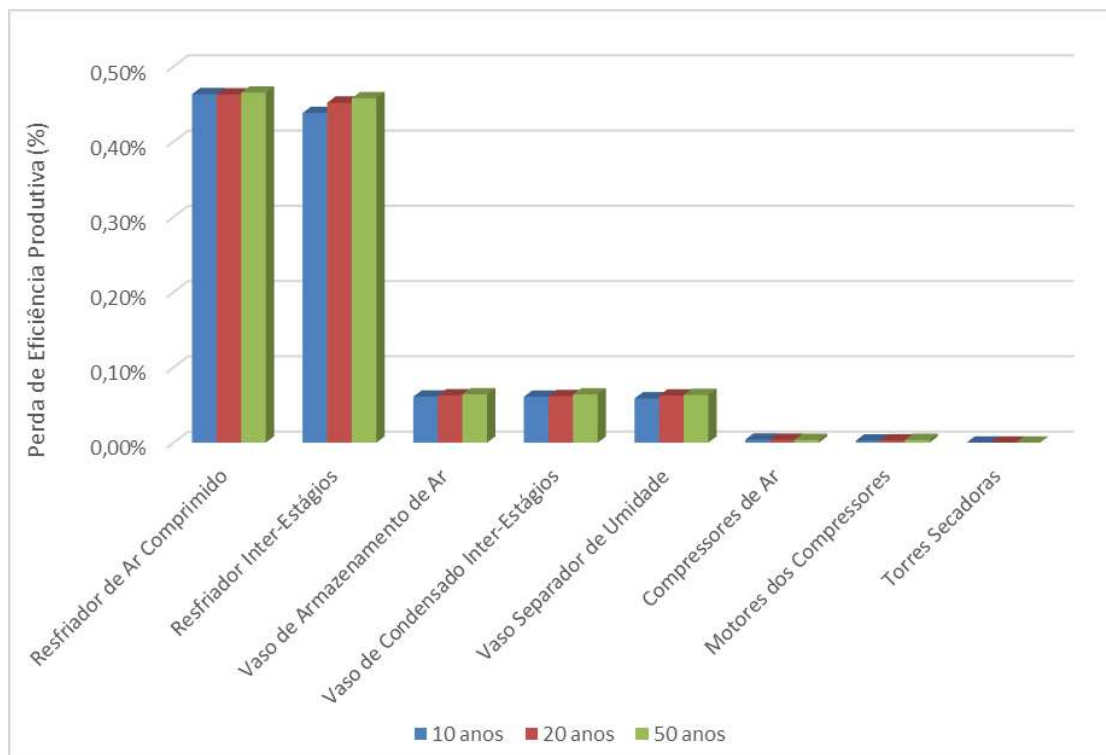
Os maiores contribuintes para as perdas de eficiência produtiva aferidas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 23.

**Tabela 23` - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média**

Categoria de Equipamento	Perda de Eficiência Produtiva (%)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Resfriador de Ar Comprimido	0,46%	0,46%	0,47%
Resfriador Inter-Estágios	0,44%	0,45%	0,46%
Vaso de Armazenamento de Ar	0,06%	0,06%	0,06%
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,06%	0,06%	0,06%
Vaso Separador de Umidade	0,06%	0,06%	0,06%
Compressores de Ar	0,00%	0,00%	0,00%
Motores dos Compressores	0,00%	0,00%	0,00%
Torres Secadoras	0,00%	0,00%	0,00%

Nota-se que os maiores contribuintes para perdas em todos os casos que utilizam dados de falha estimados segundo a distribuição de Weibull via método da média foram os resfriadores de ar e inter-estágios, seguidos dos respectivos vasos. Isso se dá pela configuração 1x100% dos mesmos, fazendo com que a indisponibilidade dos desses equipamentos cause parada do sistema. No entanto, o fato dos resfriadores apresentarem impactos significativamente maiores é devido à maior probabilidade aos tempos de reparo destes serem maiores que os dos vasos, uma vez que todos os reparos de vasos duram menos de 36 horas, enquanto há a probabilidade de cerca de 46% dos reparos de trocadores de calor durarem mais que esse tempo. Além disso, percebe-se um ligeiro aumento nas perdas de eficiência devido aos resfriadores conforme aumenta-se o tempo de vida útil simulado. Os resultados da Tabela 23 estão apresentados de forma gráfica na Figura 30.





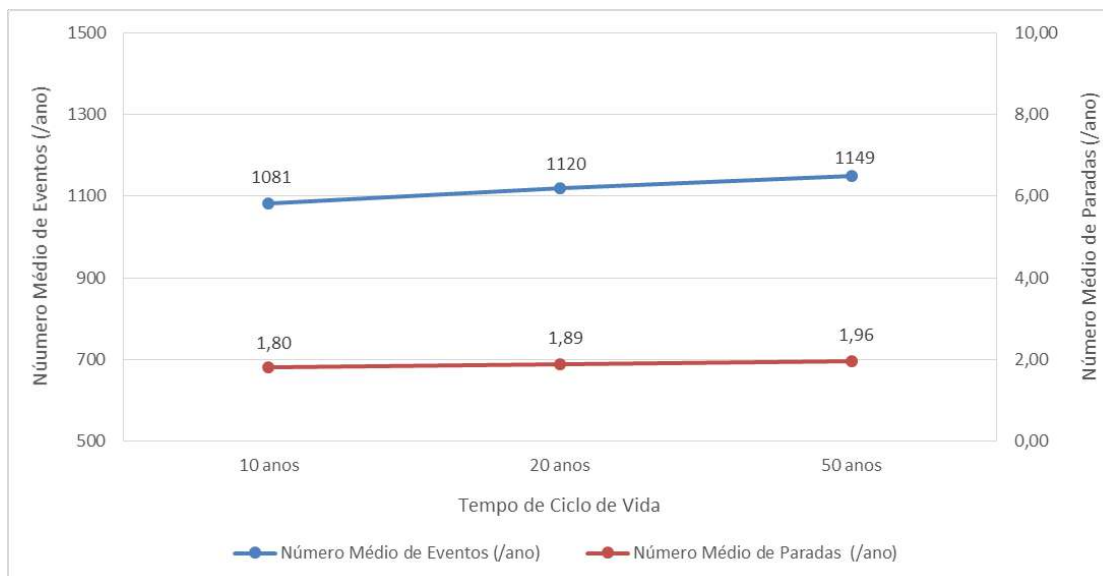
**Figura 30 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média**

Os resultados no que tange o número médio de falhas e eventos e a comparação em base percentual entre os valores obtidos desses parâmetros para cada tempo de ciclo de vida, estão apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média**

Caso	Número Médio de Paradas (/ano)	$\Delta$ Número Médio de Paradas (%)	Número Médio de Eventos (/ano)	$\Delta$ Número de Eventos (%)
10 anos	1,80	-	1081	-
20 anos	1,89	+ 4,67%	1120	+ 3,62%
50 anos	1,96	+ 8,42%	1149	+ 6,23%

Nota-se que houve um aumento considerável no número médio de paradas e eventos com o aumento do tempo de vida simulado, explicitando o efeito do envelhecimento no aumento da taxa de falha dos equipamentos. Este resultado pode ser visto graficamente na Figura 31.



**Figura 31 - Média de Paradas e Eventos por Caso de Distribuição de Weibull via Método da Média**

Os maiores contribuintes para falhas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 25 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média**

Categoria de Equipamento	Média de Falhas (falhas/ano)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Compressores de Ar	0,85	0,90	0,92
Motores dos Compressores	0,85	0,89	0,91
Torres Secadoras	0,71	0,75	0,78
Resfriador de Ar Comprimido	0,37	0,39	0,40
Vaso de Armazenamento de Ar	0,37	0,38	0,39
Resfriador Inter-Estágios	0,36	0,38	0,40
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,36	0,37	0,39
Vaso Separador de Umidade	0,35	0,38	0,39

Apesar dos resfriadores serem os principais contribuintes para perdas de eficiência média do sistema, os motores e compressores são os maiores contribuintes para falhas do sistema. Dessa forma, é importante ressaltar novamente a importância da redundância (esquema 2x100%) para esses equipamentos, uma vez

que, caso não tivesse sido projetada essa redundância, o impacto desses equipamentos na eficiência produtiva seria muito superior. Além disso, é evidente o aumento do número médio de falhas com o aumento do tempo de vida simulado, demonstrando que todos os equipamentos, mesmo que com intensidades distintas, experimentam um aumento da taxa de falha devido ao envelhecimento. Os resultados da Tabela 25 estão apresentados de forma gráfica na Figura 32.

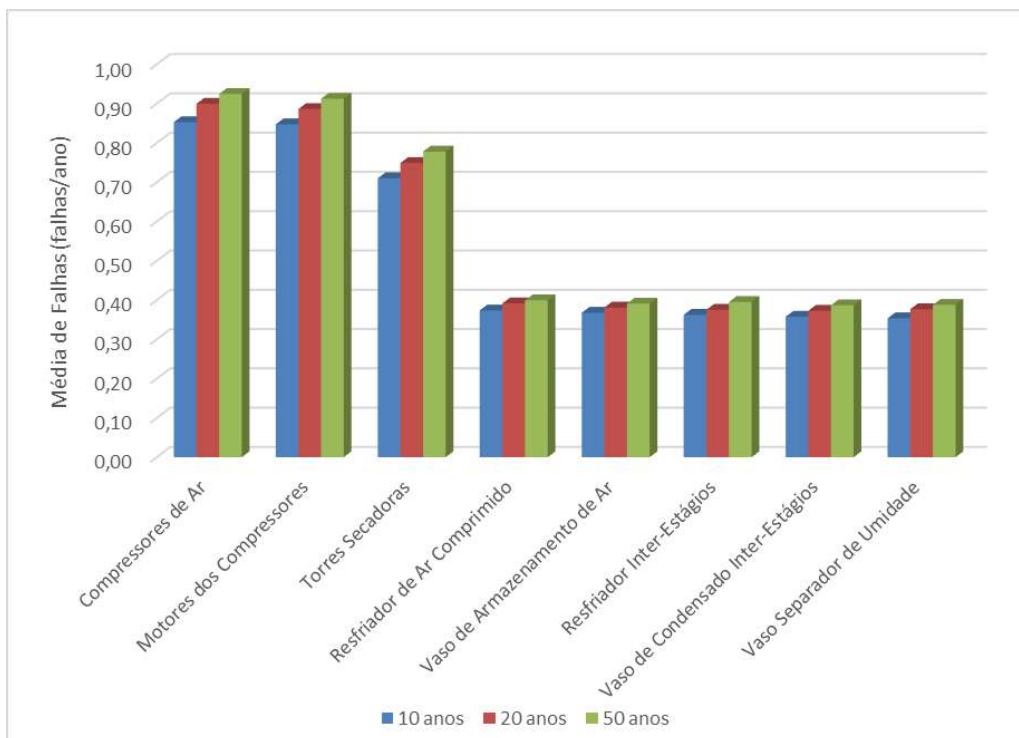


Figura 32 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Média

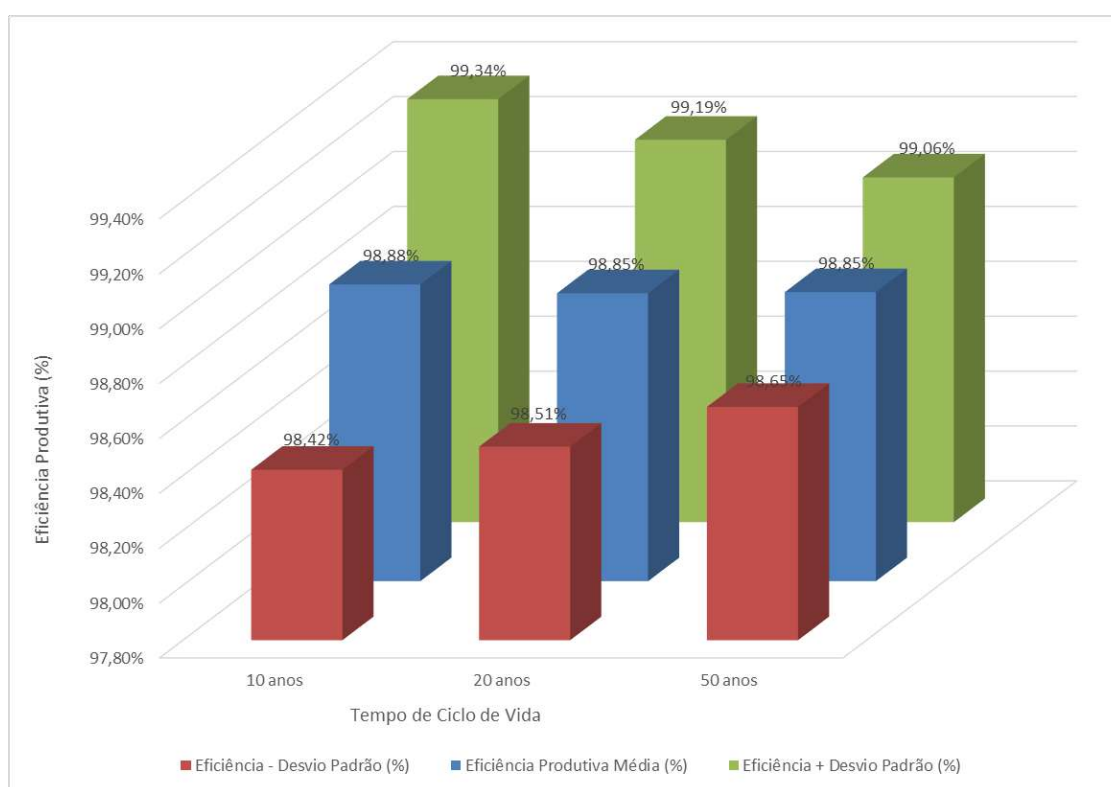
### 9.2.2. Método da Mediana

Os resultados a seguir se referem aos três casos simulados utilizando dados de falha seguindo distribuição de Weibull com parâmetros estimados pelo método da mediana e estão apresentados de maneira similar aos obtidos utilizando o método da média.

**Tabela 26 - Resultados de Eficiência Produtiva - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Caso	Eficiência Produtiva Média (%)	Desvio Padrão (%)	$\Delta$ Eficiência Produtiva Média (%)	Eficiência - Desvio Padrão (%)	Eficiência + Desvio Padrão (%)
10 anos	98,88%	0,46%	-	98,42%	99,34%
20 anos	98,85%	0,34%	-0,03%	98,51%	99,19%
50 anos	98,85%	0,20%	-0,03%	98,65%	99,06%

A análise desses resultados revela que as variações de eficiência produtiva média foram muito pequenas, assim como observado utilizando o método da mediana. Os resultados da Tabela 26 estão apresentados de forma gráfica na Figura 33.



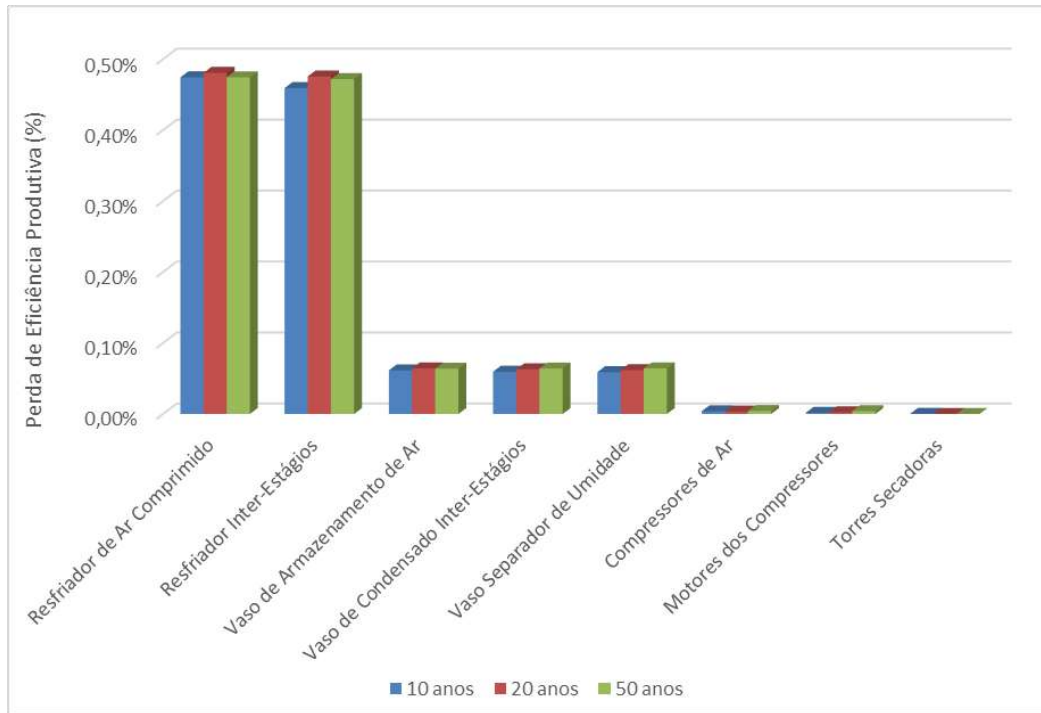
**Figura 33 - Eficiência Produtiva Média +- 1 Desvio Padrão - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Os maiores contribuintes para as perdas de eficiência produtiva aferidas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Categoria de Equipamento	Perda de Eficiência Produtiva (%)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Resfriador de Ar Comprimido	0,47%	0,48%	0,47%
Resfriador Inter-Estágios	0,46%	0,48%	0,47%
Vaso de Armazenamento de Ar	0,06%	0,06%	0,06%
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,06%	0,06%	0,06%
Vaso Separador de Umidade	0,06%	0,06%	0,06%
Compressores de Ar	0,00%	0,00%	0,00%
Motores dos Compressores	0,00%	0,00%	0,00%
Torres Secadoras	0,00%	0,00%	0,00%

Nota-se que os maiores contribuintes para perdas, ou seja, os resfriadores de ar e inter-estágios e seus respectivos vasos, foram os mesmos obtidos quando se utilizaram dados de falha estimados segundo a distribuição de Weibull via método da média, pelas mesmas razões apresentadas. Os resultados da Tabela 27 estão apresentados de forma gráfica na Figura 34.



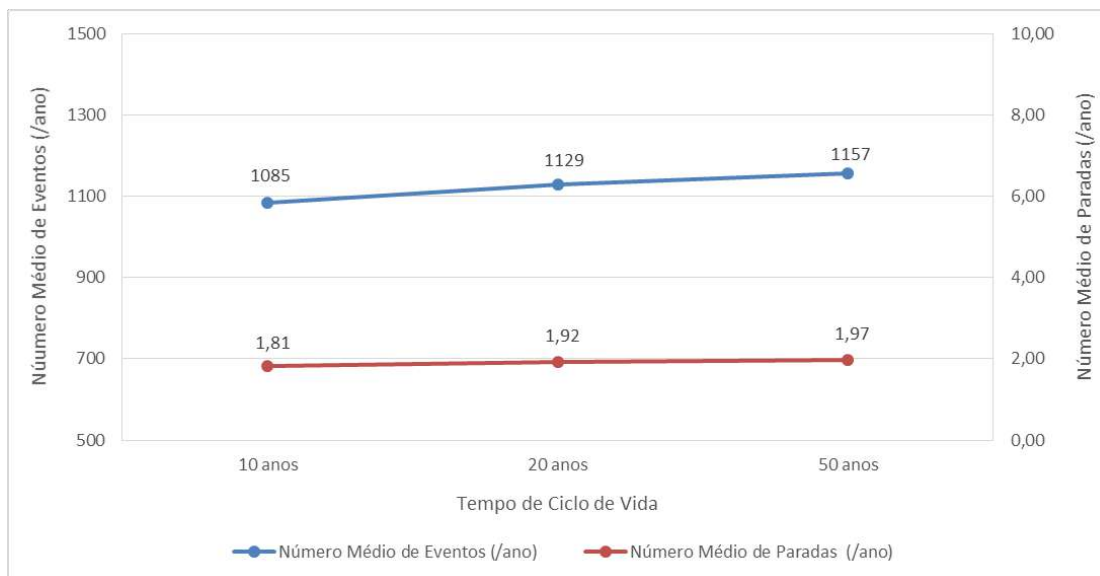
**Figura 34 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Os resultados no que tange número médio de falhas e eventos e a comparação em base percentual entre os valores obtidos desses parâmetros para cada tempo de ciclo de vida, estão apresentados na Tabela 28.

**Tabela 28 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Caso	Número Médio de Paradas (/ano)	$\Delta$ Número Médio de Paradas (%)	Número Médio de Eventos (/ano)	$\Delta$ Número de Falhas (%)
10 anos	1,81	-	1085	-
20 anos	1,92	+ 5,94%	1129	+ 4,08%
50 anos	1,97	+ 9,10%	1157	+ 6,64%

Nota-se que houve um aumento considerável no número médio de paradas e eventos com o aumento do tempo de vida simulado, explicitando o efeito do envelhecimento no aumento da taxa de falha dos equipamentos. Este resultado pode ser visto graficamente na Figura 35.



**Figura 35 - Média de Paradas e Eventos por Caso de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Os maiores contribuintes para falhas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 29.

**Tabela 29 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana**

Categoria de Equipamento	Média de Falhas (falhas/ano)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Compressores de Ar	0,86	0,90	0,93
Motores dos Compressores	0,84	0,89	0,91
Torres Secadoras	0,71	0,75	0,78
Resfriador de Ar Comprimido	0,37	0,39	0,40
Resfriador Inter-Estágios	0,37	0,39	0,40
Vaso de Armazenamento de Ar	0,37	0,39	0,39
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,36	0,38	0,39
Vaso Separador de Umidade	0,36	0,37	0,39

Os resultados descritos na tabela repetem a tendência de aumento do número de falhas devido ao envelhecimento, conforme apresentado para o método da média. Os resultados da Tabela 29 estão apresentados de forma gráfica na Figura 36.

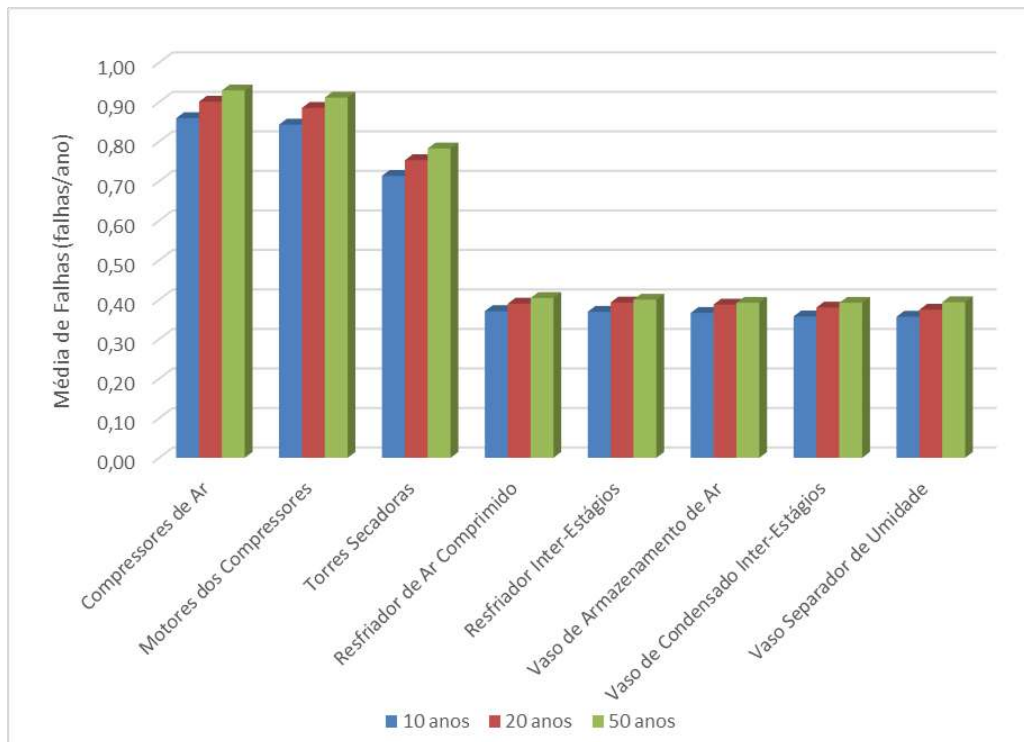


Figura 36 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição de Weibull via Método da Mediana

### 9.2.3. Método da CDF

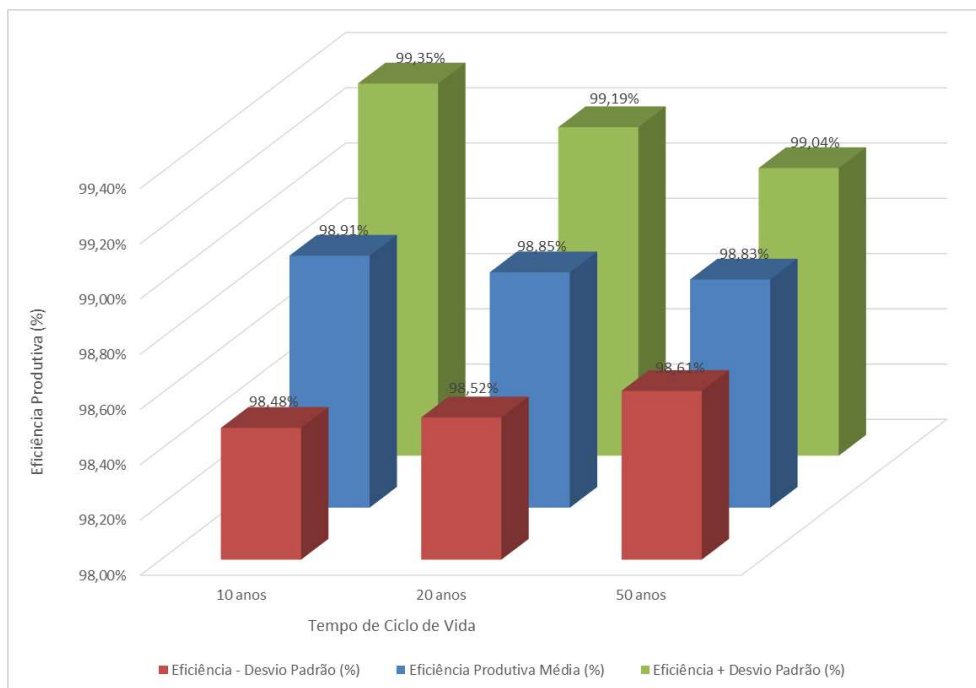
Os resultados a seguir se referem aos três casos simulados utilizando dados de falha seguindo distribuição de Weibull com parâmetros estimados pelo método da CDF e estão apresentados de maneira similar à empregada para os métodos anteriores.

Tabela 30 - Resultados de Eficiência Produtiva - Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF

Caso	Eficiência Produtiva Média (%)	Desvio Padrão (%)	$\Delta$ Eficiência Produtiva Média (%)	Eficiência - Desvio Padrão (%)	Eficiência + Desvio Padrão (%)
10 anos	98,91%	0,44%	-	98,48%	99,35%
20 anos	98,85%	0,34%	-0,06%	98,52%	99,19%
50 anos	98,83%	0,22%	-0,09%	98,61%	99,04%

A análise desses resultados revela que as variações de eficiência produtiva média foram muito pequenas, assim como observado utilizando os métodos anteriores. Os resultados da Tabela 30 estão apresentados de forma gráfica na Figura 37.





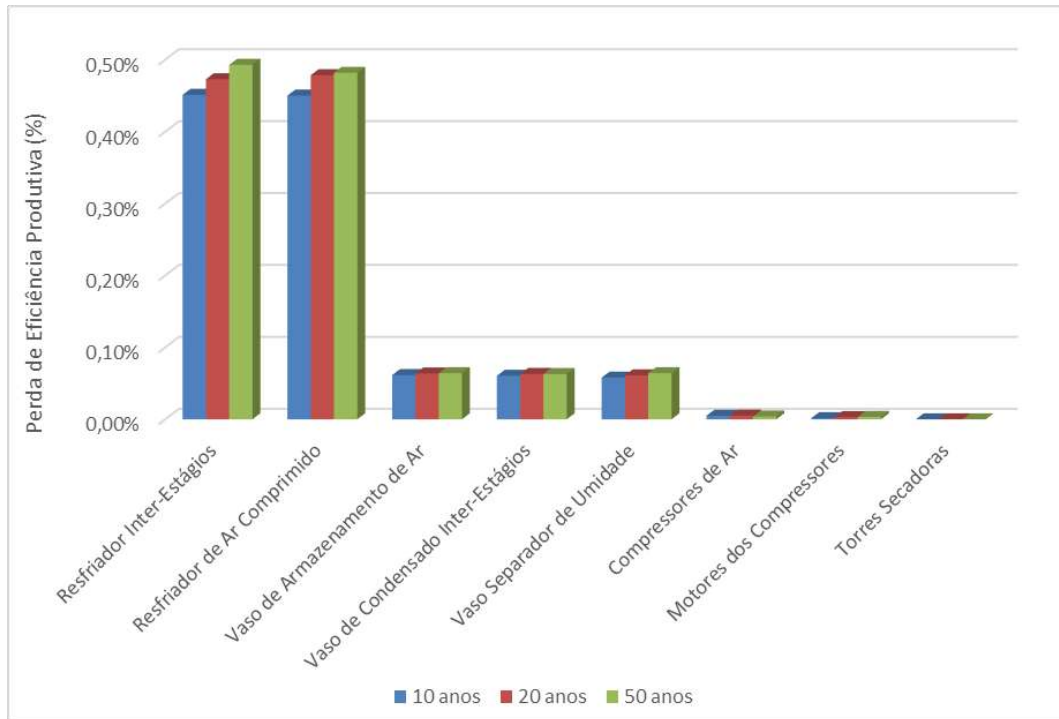
**Figura 37 - Eficiência Produtiva Média +- 1 Desvio Padrão - Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF**

Os maiores contribuintes para as perdas de eficiência produtiva aferidas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 27.

**Tabela 31 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF**

Categoria de Equipamento	Perda de Eficiência Produtiva (%)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Resfriador Inter-Estágios	0,45%	0,47%	0,49%
Resfriador de Ar Comprimido	0,45%	0,48%	0,48%
Vaso de Armazenamento de Ar	0,06%	0,06%	0,06%
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,06%	0,06%	0,06%
Vaso Separador de Umidade	0,06%	0,06%	0,06%
Compressores de Ar	0,00%	0,01%	0,00%
Motores dos Compressores	0,00%	0,00%	0,00%
Torres Secadoras	0,00%	0,00%	0,00%

Nota-se novamente que os maiores contribuintes para perdas foram os resfriadores de ar e inter-estágios e seus respectivos vasos. A explicação para este fato é a mesma apresentada para os casos anteriores. Os resultados da Tabela 31 estão apresentados de forma gráfica na Figura 38.



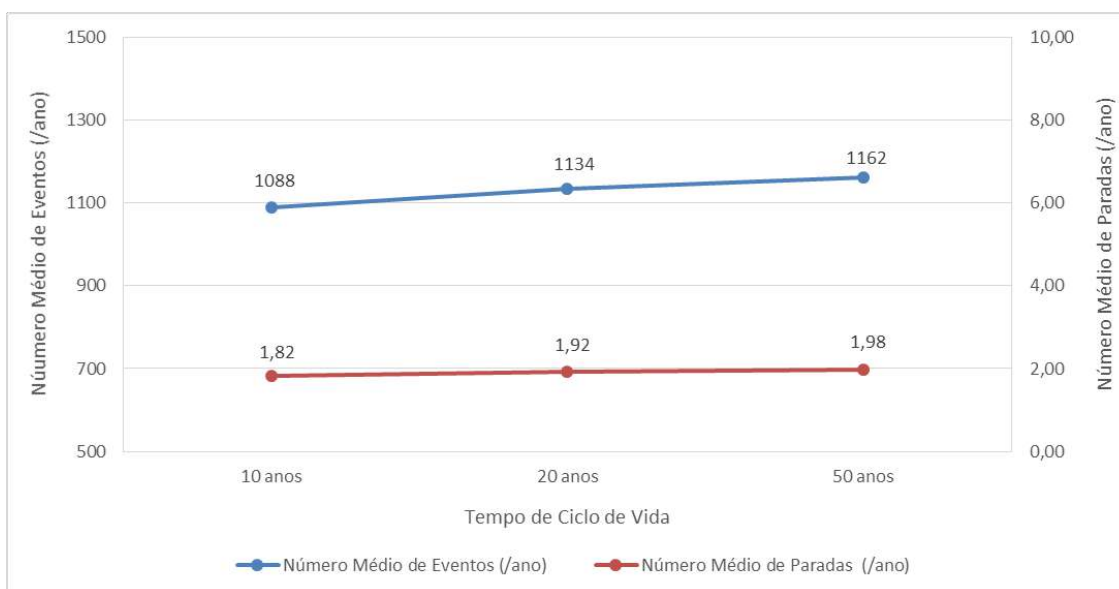
**Figura 38 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF**

Os resultados no que tange número médio de falhas e eventos e a comparação em base percentual entre os valores obtidos desses parâmetros para cada tempo de ciclo de vida, estão apresentados na Tabela 32.

**Tabela 32 - Perda de Eficiência Produtiva Média por Categoria de Equipamento – Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF**

Caso	Número Médio de Paradas (/ano)	$\Delta$ Número Médio de Paradas (%)	Número Médio de Eventos (/ano)	$\Delta$ Número de Falhas (%)
10 anos	1,82	-	1088	-
20 anos	1,92	+ 5,78%	1134	+ 4,19%
50 anos	1,98	+ 9,21%	1162	+ 6,76%

Nota-se que houve um aumento considerável no número médio de paradas e eventos com o aumento do tempo de vida simulado, explicitando o efeito do envelhecimento no aumento da taxa de falha dos equipamentos. Este resultado pode ser visto graficamente na Figura 39.



**Figura 39 - Média de Paradas e Eventos por Caso de Distribuição de Weibull via Método da CDF**

Os maiores contribuintes para falhas nos modelos simulados para 10, 20 e 50 anos estão apresentados na Tabela 33.

**Tabela 33 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF**

Categoria de Equipamento	Média de Falhas (falhas/ano)		
	10 anos	20 anos	50 anos
Compressores de Ar	0,86	0,91	0,93
Motores dos Compressores	0,85	0,89	0,92
Torres Secadoras	0,71	0,76	0,79
Resfriador Inter-Estágios	0,37	0,40	0,41
Resfriador de Ar Comprimido	0,37	0,39	0,41
Vaso de Armazenamento de Ar	0,36	0,38	0,39
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,36	0,38	0,39
Vaso Separador de Umidade	0,35	0,38	0,39

Os resultados descritos na tabela acima repetem a tendência de aumento do número de falhas devido ao envelhecimento, conforme apresentado anteriormente. Os resultados da Tabela 33 estão apresentados de forma gráfica na Figura 40.

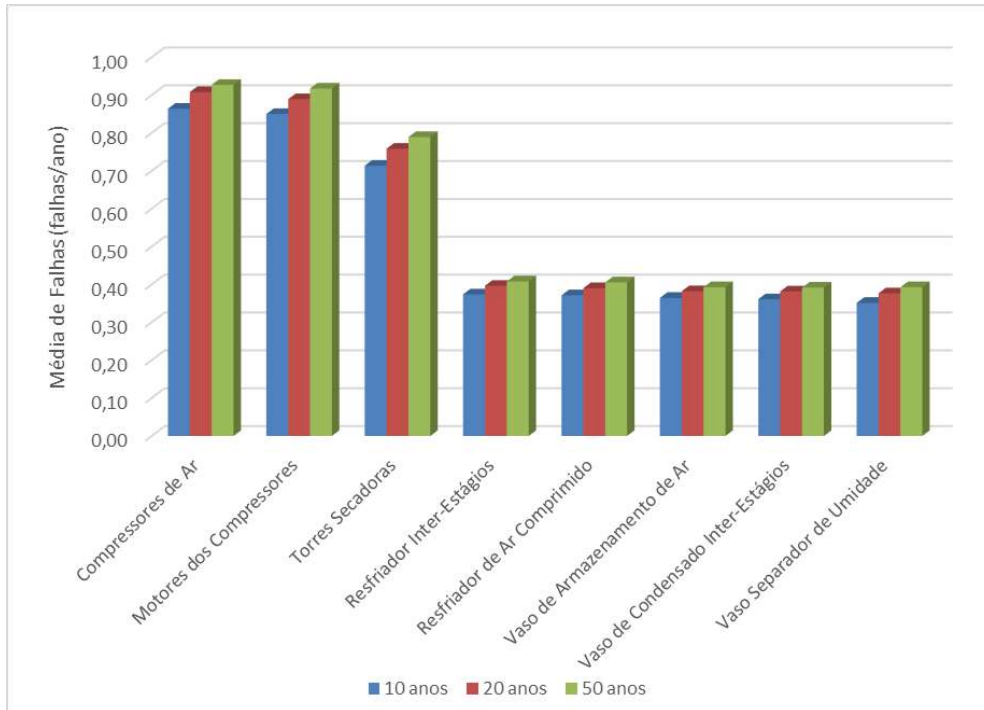


Figura 40 - Média de Falhas por Categoria de Equipamento - Casos de Distribuição de Weibull via Método da CDF

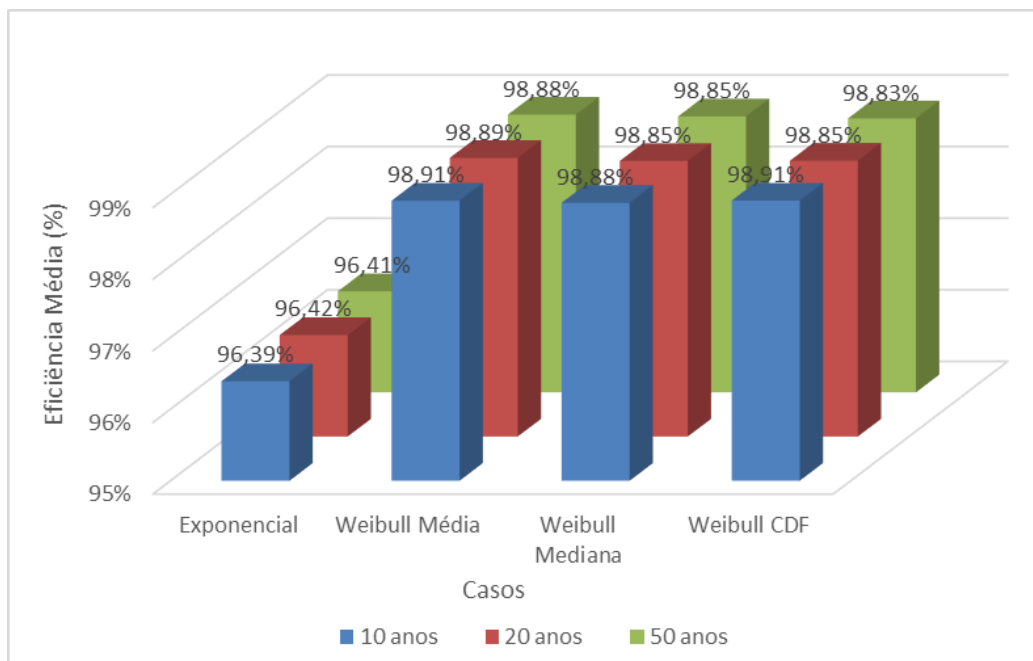
### 9.3. Análise Comparativa: Resultados Utilizando Distribuição Exponencial vs. Weibull

A Tabela 34 mostra os resultados de eficiência produtiva média para cada modelo simulado no *software* MAROS.

Tabela 34 - Eficiência Produtiva Média por Caso Simulado

Caso	Exponencial	Weibull		
		Média	Mediana	CDF
10 anos	96,39%	98,91%	98,88%	98,91%
20 anos	96,42%	98,89%	98,85%	98,85%
50 anos	96,41%	98,88%	98,85%	98,83%

Nota-se que as diferenças de eficiência produtiva foram bastante relevantes quando comparados os modelos com dados de distribuição exponencial e Weibull. Isso se dá pelos motivos apresentados na análise dos números de falha por equipamento, itens 9.4.1 e 9.4.2. Além disso, percebe-se que as perdas de eficiência produtiva não aumentaram de modo significativo com o aumento do tempo de simulação, demonstrando uma importante resistência do Sistema de Ar de Instrumento simulado ao envelhecimento. A Figura 41 apresenta os resultados da Tabela 34 de forma gráfica.



**Figura 41 - Resumo das Eficiências Produtivas Médias por Caso**

Uma vez que a análise dos resultados de eficiência produtiva não demonstrou um efeito significativo do envelhecimento, foi feita a investigação do comportamento do número de falhas (por ano) para os equipamentos do sistema simulado com o tempo simulado. Esses resultados estão resumidos na Tabela 35.

Tabela 35 – Resumo das Taxa de Falhas (/ano) dos Equipamentos por Caso Simulado

Categoria de Equipamento	Exponencial			Weibull - Média			Weibull - Mediana			Weibull - CDF		
	10 anos	20 anos	50 anos	10 anos	20 anos	50 anos	10 anos	20 anos	50 anos	10 anos	20 anos	50 anos
Compressores de Ar	13,32	13,33	13,34	0,85	0,90	0,92	0,86	0,90	0,93	0,86	0,91	0,93
Motores dos Compressores	25,19	25,23	25,27	0,85	0,89	0,91	0,84	0,89	0,91	0,85	0,89	0,92
Resfriador de Ar Comprimido	0,13	0,13	0,14	0,37	0,39	0,40	0,37	0,39	0,40	0,37	0,39	0,41
Resfriador Inter-Estágios	0,14	0,13	0,13	0,36	0,38	0,40	0,37	0,39	0,40	0,37	0,40	0,41
Torres Secadoras	0,30	0,30	0,31	0,71	0,75	0,78	0,71	0,75	0,78	0,71	0,76	0,79
Vaso de Armazenamento de Ar	0,16	0,17	0,16	0,37	0,38	0,39	0,37	0,39	0,39	0,36	0,38	0,39
Vaso de Condensado Inter-Estágios	0,15	0,15	0,16	0,36	0,37	0,39	0,36	0,38	0,39	0,36	0,38	0,39
Vaso Separador de Umidade	0,15	0,16	0,16	0,35	0,38	0,39	0,36	0,37	0,39	0,35	0,38	0,39

Nota-se pelos dados apresentados que houve uma grande diminuição no número de falhas dos compressores e seus motores quando comparados os resultados obtidos utilizando taxa de falha constante e variável. Isso provavelmente se dá pelo grande número de registros de falha desses equipamentos, fazendo com que haja grande número de falhas em todos os anos, diferentemente do que ocorre nos casos com parâmetros da distribuição de Weibull.

No entanto, percebe-se que os demais equipamentos apresentaram maiores taxas de falha nos modelos que utilizaram parâmetros de Weibull que as obtidas no modelo com distribuição exponencial. Além disso, conforme ressaltado anteriormente, essa taxa de falha é crescente com o tempo para os casos com distribuição de Weibull conforme esperado.

Por fim, os resultados mostrados acima não demonstraram diferenças significativas entre as taxas de falha obtidas para os casos com os diferentes métodos de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull. Dessa forma, é mostrado que os diferentes métodos utilizados para o Gráfico de Probabilidade de Weibull surtiram efeito somente no valor numérico dos parâmetros o que, no entanto, não se traduziu em diferenças significativas na taxa de falha dos equipamentos. Portanto, para as aplicações de RAM mostra-se que não é necessária grande precisão na estimativa dos parâmetros de Weibull.

## 10. Conclusões

Neste trabalho foram estudadas duas distribuições estatísticas, Exponencial e Weibull, de modo a verificar o envelhecimento de equipamentos industriais, sua influência na frequência de falhas e, por conseguinte, na eficiência produtiva de unidades industriais. Para tal, foi desenvolvido um modelo de simulação de eventos discretos para análise de RAM via método de Monte Carlo, baseado no arranjo generalizado de um Sistema de Ar de Instrumentos. Esse modelo mostrou-se de simples construção e muito valioso, uma vez que pôde ser observado o comportamento do sistema e seus equipamentos em função do tempo simulado, da distribuição estatística utilizada para o tratamento dos registros de falha e da configuração dos equipamentos.

O tratamento estatístico dos registros de falha de equipamentos industriais foi realizado de modo a calcular os parâmetros das distribuições exponencial e de Weibull, bem como a definir as curvas de CDF dos tempos de reparo. Além disso, foi estudada a influência do método utilizado para obtenção do gráfico de Probabilidade de Weibull nos parâmetros obtidos para a distribuição de Weibull.

A análise dos valores estimados pelos métodos da classificação por média, mediana e CDF demonstra que há pouca variabilidade entre as estimativas, principalmente quando há uma quantidade significativa de dados. Além disso, a linearização dos tempos de falha para obtenção dos parâmetros de Weibull mostrou-se satisfatória. Cabe ressaltar que o método do Gráfico da Função Hazard e os Métodos Analíticos (MLE, MOM e LSM), apresentados no Capítulo 5, não foram contemplados no estudo de caso, ficando a análise dos mesmos como sugestão de trabalho futuro.

As simulações dos casos descritos no Capítulo 8 deste trabalho foram realizadas no *software* MAROS da DNV e utilizaram os dados de falha e reparo apresentados no item 8.2 para a determinação da eficiência produtiva média do Sistema de Ar de Instrumentos, bem como do número de falhas dos equipamentos que o compõem. Assim, foi possível concluir, dentre outros, que:

- As variações de eficiência produtiva média e do número de falhas (por ano) com o tempo de simulação foram muito pequenas para os casos



simulados utilizando distribuição exponencial. Além disso, verificou-se que o desvio padrão das eficiências médias por ciclo diminui com o aumento do tempo de vida simulado para o sistema de ar de instrumento;

- As variações de eficiência produtiva média com o tempo de simulação foram muito pequenas para os casos simulados utilizando parâmetros da distribuição de Weibull estimados pelos três métodos estudados. No entanto, notou-se uma tendência de aumento do número médio de falhas e eventos por ano com o aumento do tempo de vida simulado, fato que demonstra a piora do estado dos equipamentos com o envelhecimento;
- As eficiências produtivas médias obtidas para os casos que utilizaram parâmetros de Weibull foram maiores que as obtidas nos casos com distribuição exponencial, principalmente devido à redundância dos equipamentos com maior número de falhas;
- Todos os equipamentos, exceto compressores e seus motores, apresentaram taxa de falha anual maior nos casos com distribuição de Weibull que aqueles com distribuição exponencial.

Cabe ressaltar que este trabalho serve como primeiro passo de uma série de estudos que podem ser realizados visando o entendimento da evolução da confiabilidade de equipamentos industriais com o tempo. Dessa forma, sugere-se como trabalho futuro a realização de estudos para uma unidade industrial de processo inteira, de modo a verificar a influência do envelhecimento para uma realidade específica. Além disso, estudos mais aprofundados no que tange a qualidade do registro de falhas e reparos para uso em estudos de confiabilidade são imperativos, uma vez que procedimentos padronizados para realização desses registros ainda não é uma prática muito difundida. Por fim, conforme citado anteriormente, sugere-se a realização de estudos semelhantes visando a comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os obtidos com o método do gráfico de probabilidade de Weibull e os métodos analíticos.

## Referências Bibliográficas

ABNT. *Confiabilidade e manutenibilidade NBR 5462*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 1990. 37 p.

ALVARENGA, T.V.; CASTRO, G.G.G. *Constant and Time-Varying Failure Rates based on Field Data in a Context of Reliability, Availability, Maintainability (RAM) Assessments*. ESREL Conference, Holanda. 2013.

ASCHER, H., FEINGOLD, H. *Repairable Systems Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and their Causes*. Marcel Dekker, New York, 1984.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. *Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications*. 2ª edição. Nova Jersey: Prentice Hall PTR, 2002. 625 p.

DNV. *Maros System Performance Simulator User Guide*. DNV Software, Londres, 2012.

EUROPEAN SAFETY RELIABILITY & DATA ASSOCIATION (ESREDA). *Handbook on Quality of Reliability Data*. Hovik, Noruega. 1999. 179 p.

FORBES, C.; EVANS, M.; HASTINGS, N.; PEACOCK, B. *Statistical Distributions*. 4ª edição. Nova Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011. 212 p.

MELO, P. F. F.; *et. al.* On Probability Models for the Unavailability of Analysis of Safety Systems under Aging Phenomena. *Elsevier Science*, Reino Unido, 1999.

HOKSTAD, P. *et. al.* *Ageing and life extension for offshore facilities in general and for specific systems*. SINTEF Technology and Society, 2010, 212 p.

IAM (INSTITUTE OF ASSET MANAGEMENT), BSI (BRITISH STANDARD INSTITUTION). *PAS 55-2:2008 – Asset Management Part 2: Guidelines for the Application of PAS 55-1*. 2008.

IEEE (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS). *IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*. New York, 1990.

INPO (INSTITUTE FOR NUCLEAR POWER OPERATION). *Significant Operating Experience Report (SOER) 88-1*. Institute for Nuclear Power Operation (INPO), 1988.

KRISHNAMOORTHY, K. *Handbook of Statistical Distributions with Applications*. Nova York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 344 p.

KROESE, D. P.; TAIMRE, T.; BOTEV, Z. I. *Handbook of Monte Carlo Methods*. Nova Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011. 743 p.

LAWLESS, J. F. *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. 2ª edição. Nova Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2003. 630 p.

MOHAMMAD, A. A. F. *Methods for Estimating the Parameters of the Weibull Distribution*. King Abdulaziz City for Science and Technology. Arabia Saudita, 2000.

MYUNG, I. J. Tutorial on maximum likelihood estimation. *Journal of Mathematical Psychology*, Ohio, p. 90-100, 2003.

OLIVEIRA, E. A. *et. al.* *Unavailability analysis of safety systems under aging by supplementary variables with imperfect repair*. Anais...Rio de Janeiro: Energia Nuclear, 2005, p. 241-252.

PRECKWINKLE, S.; WEBBER, K. *Instrument Air Systems, A Guide for Power Plant Maintenance Personnel*. BPC Technical Services, INC. Louisiana, 1990.

RETTERTH, B.; VENKATA, S. S. Impact of time failure rates on distribution reliability. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 27, p. 682-688, 2005.