

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**EWERLYN ANE PERUSSOLO GUELBERT**

**ANÁLISE DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DO REGULADOR  
DE VELOCIDADE DE UMA USINA HIDRELÉTRICA**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA  
2019**

**EWERLYN ANE PERUSSOLO GUELBERT**

**ANÁLISE DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DO REGULADOR  
DE VELOCIDADE DE UMA USINA HIDRELÉTRICA**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues

**CURITIBA**

**2019**



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



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE DAS MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE DO REGULADOR DE VELOCIDADE DE UMA USINA HIDRELÉTRICA

por

EWERLYN ANE PERUSSOLO GUELBERT

Esta monografia foi apresentada em 04 de Outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A aluna foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.  
Professor Orientador – UTFPR

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Membro Titular da Banca – UTFPR

---

Prof. Wanderson Stael Paris, MSc.  
Membro Titular da Banca – UTFPR

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente os parágrafos que seguem não atenderão a todas as pessoas que participaram de alguma forma para a realização deste trabalho. Portanto, peço desculpas de antemão àquelas que não se fazem presentes pelas palavras, mas com certeza fazem parte dos meus pensamentos e que terei imensa gratidão.

Reverencio o Professor Marcelo Rodrigues pela sua dedicação e valiosa orientação, bem como pela oportunidade de me auxiliar nessa trajetória.

Também gostaria de agradecer em especial os professores integrantes de da Banca Examinadora, que contribuíram com relevantes observações e informações para a conclusão desse estudo. Por meio deles, me reporto a toda à comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), em especial a coordenação do curso e o Departamento Acadêmico de Eletrotécnica pelo apoio na realização deste TCC.

A todos os colegas, que de uma forma ou outra, incentivaram, sugeriram e ajudaram na elaboração dessa pesquisa.

Não posso deixar de mencionar o apoio recebido da MCQ Eletro Service que incentiva o constante aprendizado de seus funcionários e agradecer o financiamento de parte desse curso.

Por fim, mas não menos importante, agradamos a todos os nossos familiares e amigos que nos apoiaram na realização deste trabalho, pois sem a compreensão de todos seria de grande pesar concluir este desafio.

## RESUMO

GUELBERT, Ewerlyn Ane P. **Análise das métricas de Confiabilidade do Regulador de Velocidade de uma Usina Hidrelétrica.** 2019. 60 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Segundo a ANEEL, 60% da energia elétrica do Brasil é proveniente de hidroelétricas. O processo de geração desta energia possui certa complexidade e está associado à disponibilidade dos geradores. A aplicação do estudo de engenharia de confiabilidade busca o aumento da disponibilidade destes ativos, reduzindo a probabilidade de falhas dos equipamentos e, conseqüentemente, os custos de reparo e perdas de receita sobre o tempo em que a máquina permaneceu inoperante. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é analisar o comportamento da confiabilidade de um regulador de velocidade de uma unidade geradora de uma usina hidroelétrica utilizando as métricas de confiabilidade, para o período em que a equipe de manutenção fez uso de uma metodologia de análise de causa raiz para sanar as falhas. Os dados levantados e tratados foram inseridos no *software* Weibull++ da Reliasoft para se obter as funções Densidade de Probabilidade de Falha e Probabilidade Acumulada de Falha, Confiabilidade, Taxa de Falha e Tempo Médio Entre Falhas. Esses resultados permitiram a análise comparativa do desempenho da confiabilidade para os anos de 2016, 2017 e 2018. Percebeu-se um aumento significativo da confiabilidade do sistema e concluiu-se que é vantajosa a aplicação da Engenharia de Confiabilidade para avaliar o desempenho do equipamento e traçar metas de para o tratamento das falhas. A utilização da Engenharia de Confiabilidade combinada com um método de análise de falha para encontrar a causa raiz permitiu que a equipe de manutenção intervisse assertivamente no equipamento, aumentando a confiabilidade do sistema e sua disponibilidade como um todo.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Disponibilidade. Regulador de Velocidade. Usina Hidrelétrica. LDA.

## ABSTRACT

GUELBERT, Ewerlyn Ane P. **Life Data Analysis of a Speed Regulator in a Hydroelectric Power Plant**. 2019. 60 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

According to ANEEL, 60% of Brazil's electricity comes from hydroelectric dams. The generation process of this energy has some complexity and is related to the availability of generators. The application of the reliability engineering study tries to increase the availability of these assets, reducing the probability of equipment failures and, consequently, repair costs and revenue losses over the time the machine has been turned off due to failures. This work's goal is to analyze the reliability behavior of a speed regulator of a hydroelectric power plant unit using the reliability metrics, while the maintenance team uses the root cause analysis methodology to solve the faults. The collected and treated data were entered into Reliasoft's Weibull++ software to obtain the Failure Probability Density and Accumulated Failure Probability, Reliability, Failure Rate, and Mean Time Between Failures functions. These results allowed a comparative analysis of reliability performance for the years of 2016, 2017 and 2018. A significant increase in system reliability was perceived and it was concluded that the application of Reliability Engineering supports the evaluation of equipment performance and setting goals for failure treatment. Using Reliability Engineering combined with a failure analysis method to find the root cause has allowed the maintenance team to intervene assertively in the equipment, increasing system reliability and overall availability.

**Key-words:** Reliability. Availability. Speed Regulator. Hydroelectric Power Plant.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Fluxograma do protocolo de pesquisa desse trabalho.....	17
Figura 2.1: Partes do Regulador de Velocidade.....	22
Figura 2.2: Representação por blocos do sistema de malha fechada do RV.....	22
Figura 2.3: Etapas de funcionamento do RV.....	23
Figura 3.1: Histograma.....	28
Figura 3.2: Função probabilidade de falha entre a e b.....	28
Figura 3.3: Função Probabilidade Acumulada de Falha.....	29
Figura 3.4: Probabilidade de falha até o tempo a e probabilidade de sucesso (confiabilidade) a partir de a.....	30
Figura 3.5: Curva da banheira idealizada.....	32
Figura 3.6: Influência de $\beta$ na função densidade de probabilidade de Weibull.....	35
Figura 3.7: Influência de $\eta$ na função densidade de probabilidade de Weibull.....	36
Figura 4.1: Teste de aderência gerado pelo do software.....	39
Figura 4.2: Aderência dos dados de 2016 na distribuição Weibull-3P.....	40
Figura 4.3: Função Densidade de Probabilidade (pdf) para o ano de 2016.....	41
Figura 4.4: Taxa de falha x Tempo de 2016.....	42
Figura 4.5: Curva da Probabilidade acumulada de Falha x Tempo (cdf) para o ano de 2016 e valor da probabilidade de falha para uma missão de 360 horas...	42
Figura 4.6: Confiabilidade x Tempo para o ano de 2016 e valor da confiabilidade para uma missão de 360 horas.....	43
Figura 4.7: Valor calculado de MTTF (equivalente ao MTBF adotado no estudo) referente a 2016.....	43
Figura 4.8: Teste de aderência gerado pelo do software.....	45
Figura 4.9: Aderência dos dados de 2017 na distribuição Weibull-3P.....	45
Figura 4.10: Função Densidade de Probabilidade (pdf) com os dados de 2016 e 2017.....	47
Figura 4.11: Curva da Probabilidade acumulada de Falha x Tempo para o ano de 2017 e valor da probabilidade de falha para uma missão de 360 horas.....	47
Figura 4.12: Confiabilidade x Tempo de 2017 e valor da confiabilidade para uma missão de 360 horas.....	48
Figura 4.13: Confiabilidade x Tempo para os anos de 2016 e 2017.....	48
Figura 4.14: Valor calculado de MTTF (equivalente ao MTBF adotado no estudo) referente a 2017.....	49
Figura 4.15: Teste de aderência gerado pelo do software.....	50
Figura 4.16: Aderência dos dados de 2018 na distribuição Weibull-2P.....	51
Figura 4.17: Curvas de taxas de falhas dos anos de 2016, 2017 e 2018.....	52
Figura 4.18: Curvas de função de densidade de probabilidade dos anos de 2016, 2017 e 2018.....	52
Figura 4.19: Curva da Probabilidade acumulada de Falha x Tempo (cdf) para o ano de 2018 e valor da probabilidade de falha para uma missão de 360 horas...	53
Figura 4.20: Confiabilidade x Tempo para o ano de 2018 e valor da confiabilidade para uma missão de 360 horas.....	53

Figura 4.21: Curvas de Confiabilidade dos anos de 2016, 2017 e 2018.....	54
Figura 4.22: Valor calculado de MTTF (equivalente ao MTBF adotado no estudo) referente a 2018.....	55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Desligamentos totais e por equipamentos nos últimos três anos .....	16
Tabela 1.2 – Quantidade de desligamentos ocasionados por falha no RV por Unidade Geradora.....	16
Tabela 4.1 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2016 ..	38
Tabela 4.2 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2017 ..	44
Tabela 4.3 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2018. .	49
Tabela 4.4 – Resultados obtidos no <i>software</i> para 2016, 2017 e 2018.....	55

## LISTA DE QUADROS

Tabela 1.1 – Desligamentos totais e por equipamentos nos últimos três anos .....	16
Tabela 1.2 – Quantidade de desligamentos ocasionados por falha no RV por Unidade Geradora.....	16
Tabela 4.1 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2016 ..	38
Tabela 4.2 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2017 ..	44
Tabela 4.3 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2018. .	49
Tabela 4.4 – Resultados obtidos no <i>software</i> para 2016, 2017 e 2018.....	55

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	Ambiente de Comercialização Livre
ACR	Ambiente de Comercialização Regulado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CDF	Probabilidade Acumulada de Falha
LDA	Análise de Dados de Vida
MTTF	Tempo Até Falha ( <i>Mean Time to Failures</i> )
MTBF	Tempo Médio Entre Falhas ( <i>Mean Time Between Failures</i> )
NBR	Norma Técnica
ONS	Operador Nacional do Sistema
PDF	Probabilidade Acumulada de Falha
QCP	<i>Quick Calculation Pad</i>
RV	Regulador de Velocidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencia
UG	Unidade Geradora

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda(t)$	Taxa de Falha
$\lambda$	Parâmetro da distribuição exponencial
$\mu$	Média dos tempos até falha
$\sigma$	Desvio padrão dos tempos até falha
$\mu'$	Média dos logaritmos naturais de tempos até falha
$\sigma'$	Desvio padrão dos logaritmos naturais dos tempos até falha
$\beta$	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
$\eta$	Vida característica
$\gamma$	Vida mínima
MW	Megawatt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>O AMBIENTE DA FALHA</b> .....	20
2.1	REGULADOR DE VELOCIDADE .....	20
2.1.1	Funcionamento.....	21
2.2	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	23
<b>3</b>	<b>MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE</b> .....	25
3.1	DADOS.....	26
3.1.1	Variáveis aleatórias .....	26
3.2	INDICADORES DE MANUTENÇÃO (MTTF E MTBF) .....	27
3.3	FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) E PROBABILIDADE ACUMULADA DE FALHA (CDF) .....	27
3.4	FUNÇÃO CONFIABILIDADE $R(x)$ .....	30
3.5	FUNÇÃO TAXA DE FALHA $\lambda(x)$ .....	31
3.6	MODELOS PROBABILÍSTICOS .....	31
3.6.1	Curva da banheira .....	31
3.6.2	Distribuição Exponencial .....	32
3.6.3	Distribuição Normal (desgaste) .....	33
3.6.4	Distribuição Lognormal.....	33
3.6.5	Distribuição Weibull .....	34
3.7	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	36
<b>4</b>	<b>TRATAMENTO DOS DADOS E RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	38
4.1	DADOS DO ANO DE 2016.....	38
4.2	DADOS DO ANO DE 2017.....	44
4.3	DADOS DO ANO DE 2018.....	49
4.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	55
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

Como em qualquer outro segmento industrial, as usinas geradoras de energia procuram maior disponibilidade dos geradores, a fim de atender os contratos de venda de energia e/ou aumentar o faturamento oferecendo ao mercado energia além da contratada. Essa disponibilidade é necessária para melhor utilização da oferta de matéria prima renovável, que nem sempre pode ser armazenada e controlada.

Nesse sentido, as empresas do setor buscam, por meio da manutenção, melhorias contínuas que visem o aumento da disponibilidade do ativo, evitando perdas de produção e faturamento ou até multas quando não são cumpridos os acordos contratuais.

Nessa busca de melhorias, um fator importante é reduzir a probabilidade de falhas do equipamento, diminuindo assim os custos de reparo que envolvem mão de obra, equipamentos e ferramentas, e também os custos de perda de produção pelo tempo em que a máquina permaneceu improdutivo.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), a disponibilidade de equipamentos é um dos principais indicadores de confiabilidade utilizados em programas de manutenção. Tratar das causas das falhas e propor melhorias para que a quantidade de falhas diminua significa aumentar a confiabilidade do ativo.

Já a confiabilidade, segundo a norma ABNT NBR 5462 (1994), é definida como a probabilidade de um ativo desempenhar uma determinada função, de forma adequada, durante um intervalo de tempo, sob condições especificadas. Ou seja, a operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras e falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

O estudo de confiabilidade permite estimar a probabilidade de falha e, dessa forma, auxilia a equipe de manutenção a tomar decisões mais assertivas para melhorar o desempenho do ativo e ao mesmo tempo reduzir o custo da manutenção.

Para tratar de um tipo de falha recorrente, que acarreta em perda de geração de energia, esse trabalho propõe uma análise de dados de vida (LDA), de um regulador de velocidade de turbina hidráulica de uma determinada usina hidrelétrica

e a aplicação de um método de análise das causas raízes com o propósito de investigar o motivo das falhas e propor ações que eliminem ou minimizem o problema.

Como ferramenta de auxílio para este estudo, será utilizado o *software* Weibull++ da Reliasoft para realizar a análise dos dados de falhas do equipamento com dados históricos de 2016, 2017 e 2018.

## 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O Brasil é um dos países com maior abundância em recursos hídricos, o que proporciona a energia hidráulica como o principal recurso energético. De acordo com os dados do Operador Nacional do Sistema (ONS), em 2018, 67,5% da produção nacional de energia elétrica foi proveniente de usinas hidrelétricas.

Entretanto, se os geradores apresentarem baixa disponibilidade, o sistema poderá sofrer impactos decorrentes disso. O ONS realiza programações para atender as demandas diárias de carga. Para isso, leva em conta números de geradores disponíveis e volume de água armazenado nos reservatórios de todo o país. Quando ocorre uma estiagem, é necessário acionar outras formas de geração de energia disponíveis (não renováveis), o que encarece o valor da energia para o consumidor. Em casos de indisponibilidade de máquinas geradoras, isso também pode acontecer, porém, o valor recai também nas empresas geradoras.

As empresas de energia que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN) negociam a compra e venda de energia dois ambientes de negociação: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), conforme CCEE, 2019.

Em ambos, ao final de cada mês, é realizada a contabilização da diferença entre a energia medida e a energia contratada. Caso a geradora não consiga fornecer a energia de acordo com estabelecido em contrato, estará sujeita a multa além de perda da receita pela energia faltante. Por outro lado, a energia excedente do contrato pode ser comercializada com possibilidade de grandes lucros nas épocas de estiagem.

Diante de tais problemas, faz-se necessário encontrar e aplicar metodologias que aumentem a disponibilidade das máquinas e, conseqüentemente, a quantidade de energia gerada.

Aumentar a disponibilidade de energia significa reduzir custos além de garantir progresso econômico ao país, proporcionando melhora nas condições de vida da população.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento da confiabilidade de um regulador de velocidade da unidade geradora de uma usina hidroelétrica com os dados de antes e depois de intervenção da manutenção.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar os tempos entre falhas e a quantidade de falhas ocorridas num regulador de velocidade nos anos de 2016, 2017 e 2018;
- Aplicar os dados históricos de falha do equipamento no *software* Weibull++ da Reliasoft para escolher a distribuição que modele a vida útil do equipamento;
- Estimar os parâmetros que irão se ajustar a distribuição e estimar as características de vida do produto utilizando Análise de Dados de Vida (LDA);
- Obter as funções de densidade de probabilidade (pdf), probabilidade acumulada de falha (cdf), confiabilidade  $R(x)$  e taxa de falha  $\lambda(x)$  para os anos de 2016, 2017 e 2018;
- Comparar os resultados obtidos antes e depois da intervenção da manutenção.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

Ao buscar oferecer maior disponibilidade possível, é importante que os geradores hidrelétricos busquem o motivo causador da falha que deve ser analisado com afinco até que o problema seja sanado, evitando as falhas repetitivas que causam indisponibilidade.

Em determinada usina hidrelétrica, foi realizado um levantamento dos equipamentos que apresentam as falhas que ocasionaram perda de geração nos últimos três anos. Constatou-se que o ativo que mais ocasiona perda de geração é a Linha de Transmissão, com falhas decorrentes de descargas atmosféricas ou oscilações de frequência oriundas do sistema. Porém, esse tipo de falhas não são tratadas pela equipe de manutenção da usina. Por esse motivo, esses dados dessas falhas não entrarão no estudo e verificou-se que os Reguladores de Velocidade são o segundo equipamento que mais apresenta falhas que resulta em perda de geração. Nos três anos analisados, foram 56 desligamentos envolvendo esse equipamento o que representou 15% do total de desligamentos que ocorreram na usina.

Tabela 1.1 – Desligamentos totais e por equipamentos nos últimos três anos:

	2016	2017	2018	Total	%
<b>Desligamentos da planta</b>	106	122	142	370	100%
<b>Desligamentos causados por falha na linha de transmissão</b>	69	81	104	254	68%
<b>Desligamentos causados pelo RV</b>	23	24	9	56	15%

Fonte: a autora (2019).

Essa hidrelétrica possui três Unidades Geradoras. Observando individualmente cada uma delas, a UG 02 foi a mais afetada com desligamentos dessa natureza, conforme está detalhado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Quantidade de desligamentos ocasionados por falha no RV por Unidade Geradora:

	2016	2017	2018	Total
<b>UG1</b>	4	17	2	23
<b>UG2</b>	17	6	4	27
<b>UG3</b>	2	1	3	6

Fonte: a autora (2019).

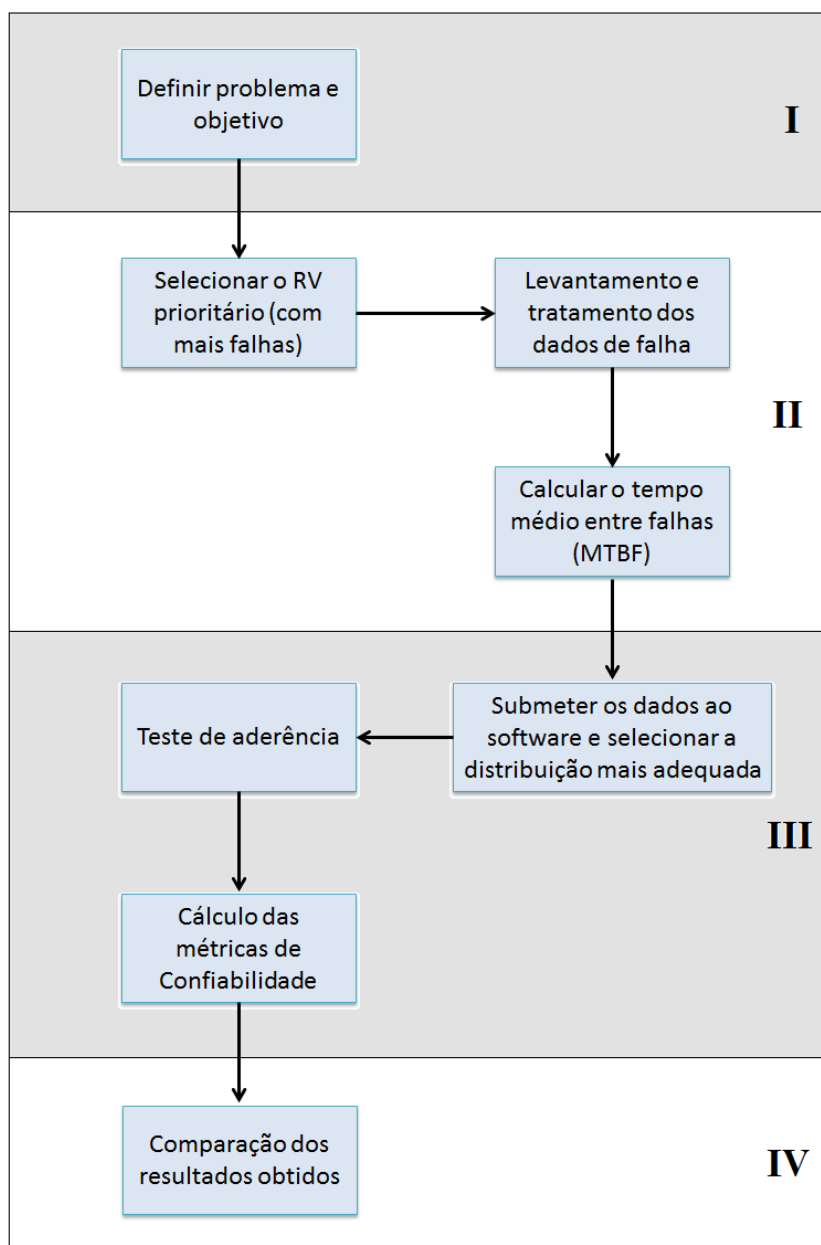


Dada a severidade de indisponibilidade da UG2, o Regulador de Velocidade dessa máquina foi tratado primeiramente e serão apresentadas as métricas de confiabilidade do item, antes e depois da intervenção da equipe de manutenção.

### 1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia que será aplicada nesse trabalho está apresentada no protocolo de pesquisa mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1: Fluxograma do protocolo de pesquisa desse trabalho.



Fonte: a autora (2019).

A etapa I engloba a problematização e a definição dos objetivos que se quer alcançar com o trabalho.

A etapa II compreende o levantamento e tratamento dos dados a respeito do objeto de estudo. O levantamento das falhas será obtido no banco de dados de ocorrências da usina. Esses dados passarão por uma análise e seleção apenas dos dados que dizem respeito ao regulador que apresenta mais falhas. Ainda nessa etapa, será calculado o MTBF que será utilizado no *software* para os cálculos.

Na terceira etapa, os dados organizados serão inseridos no *software* Weibull++ da Reliasoft e será escolhida a distribuição mais adequada para representar a vida do equipamento, além de serem aplicados testes de aderência afim de comprovar adesão dos dados ao modelo.

Serão calculados os indicadores necessários para a análise, ou seja, Função Densidade de Probabilidade de Falha  $f(x)$ , Probabilidade Acumulada de Falha  $F(t)$ , Confiabilidade  $R(x)$  e Taxa de Falha  $\lambda(x)$ , o que permitirá uma avaliação quantitativa dos resultados.

Por fim, a etapa IV envolve a apresentação dos resultados obtidos através de um comparativo entre antes e depois do tratamento dado pela manutenção para a correção da falha e demonstrado como essas ações contribuíram para a melhoria da confiabilidade.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é descrita a seguir:

Capítulo 2: O Ambiente da Falha. Neste capítulo será apresentada com maiores detalhes a planta da usina hidrelétrica e suas características. Também será abordada a função e a funcionalidade do regulador de velocidade.

Capítulo 3: Métricas de Confiabilidade. Será feita uma abordagem teórica sobre a Confiabilidade e o que é importante para realizar a análise de dados de vida e compreender seus resultados.

Capítulo 4: Tratamento dos dados e resultados obtidos. Neste capítulo serão apresentados os resultados fornecidos pelo *software* Weibull++ da ReliaSoft a partir

dos dados de falha do regulador de velocidade, bem como a análise do comportamento de vida do regulador em função das falhas históricas.

Capítulo 5: Considerações finais. A partir da análise qualitativa dos resultados obtidos na simulação serão feitas apresentações do comportamento de vida do regulador antes e depois da intervenção da manutenção.

## 2 O AMBIENTE DA FALHA

Este capítulo apresentará detalhes da usina hidrelétrica em que foi observada a falha bem como a função do regulador de velocidade no processo de geração e o seu funcionamento. É importante conhecer o sistema responsável pela geração de energia e o local onde foram feitas as coletas de dados que serviram para o estudo. O detalhamento do funcionamento do RV pode ampliar o entendimento do leitor quanto a variedade de falhas e suas respectivas causas.

A empresa que realiza serviço de operação e manutenção na usina, foi contratada, via contrato bienal, para prestar serviços na usina em questão, à qual chamaremos de Usina A, com potência instalada de 32 MW, distribuídas em 3 unidades geradoras com turbinas do tipo Francis dupla. Ao iniciar o trabalho, também se iniciou um controle de falhas, via relatórios, para mapear a situação dos equipamentos e poder traçar estratégias de melhorias.

Logo foi percebido que havia diferentes tipos de falhas, dentre os sistemas envolvidos no processo de geração, porém o equipamento que mais apresentava problemas eram os reguladores de velocidade das unidades geradoras. Dessa forma, a equipe de manutenção verificou qual UG deveria ser tratada com prioridade, de acordo com a incidência de falhas. Dentre as três unidades geradoras, a que apresentou maior ocorrências foi a UG2, conforme demonstrado no Capítulo 1.

A partir disso, a equipe de técnicos da usina juntamente com o suporte da engenharia de manutenção, realizaram análises de causa raiz para identificar as causas e propor ações corretivas para sanar anormalidades. Para as análises é indispensável conhecer o funcionamento do RV. Por isso, o próximo item irá discorrer brevemente sobre a aplicação e funcionalidade do regulador no sistema de geração.

### 2.1 REGULADOR DE VELOCIDADE

Um gerador também é chamado de máquina síncrona por existir sincronismo entre o campo do rotor e o campo do estator que mantem a velocidade de rotação do eixo constante, respeitando os parâmetros de tensão e frequência da rede.

O regulador de velocidade é o sistema responsável por manter essa velocidade de rotação do conjunto turbina/gerador constante, agindo diretamente na quantidade de água que passa pela turbina.

De acordo com Reivax (2012), o Regulador de Velocidade tem como principais funções:

- Manter a frequência do gerador no valor seu valor nominal (60 Hz);
- Manter a velocidade dentro da faixa operacional de trabalho mesmo quando houver distúrbios no sistema;
- Responder os comandos do operador ou sincronizador automático, tomando carga linearmente rapidamente;
- Corrigir rapidamente as variações de frequência postas por variação de carga e/ou geração no sistema;
- Controlar (e limitar, caso necessário) dinamicamente a abertura máxima do distribuidor.

Quando o gerador está conectado à rede, o RV monitora o valor de frequência do sistema e, utilizando valores de referência, combina dispositivos que possam detectar desvios da velocidade e os corrige regulando a abertura do distribuidor para ajuste da vazão de entrada de água, minimizando as variações e melhorando a estabilidade do conjunto turbina/gerador. Por consequência, ele se torna responsável pelo controle da potência ativa gerada.

### 2.1.1 Funcionamento

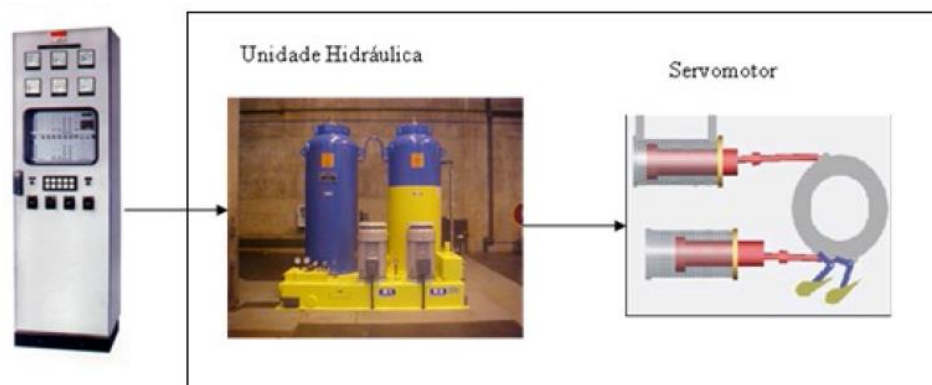
Um Regulador de Velocidade é formado por uma parte eletromecânica e outra parte hidráulica. Essas partes são ligadas por uma válvula chamada válvula proporcional.

A parte eletromecânica é formada sensores de velocidade, dispositivos condicionadores de sinal, transdutores eletromecânicos e amplificadores hidráulicos que tem como função monitorar a rotação e a potência da unidade geradora.

Já na parte hidráulica estão as bombas, filtros, acumulador de pressão e válvulas que tem como objetivo pressurizar o óleo até o servomotor hidráulico ligado

ao distribuidor da turbina, que é o elemento responsável por regular a vazão de água que passa pela turbina, conforme ilustra a Figura 2.1.

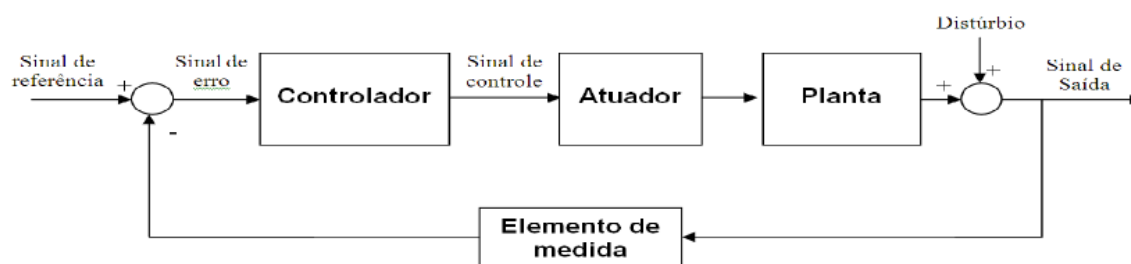
Figura 2.1: Partes do Regulador de Velocidade.



Fonte: Reivax (2012).

O sistema funciona em um sistema de controle com realimentação, a qual é inserida uma referência de frequência, representada por uma tensão, que é comparado com o sinal lido pelo sensor de velocidade, também representada por uma tensão. A diferença entre essa comparação é chamada de desvio da frequência, que é enviada à entrada do circuito compensador que entrega na saída o sinal que será aplicado no transdutor mecânico. A Figura 2.2 ilustra essa realimentação:

Figura 2.2: Representação por blocos do sistema de malha fechada do RV.

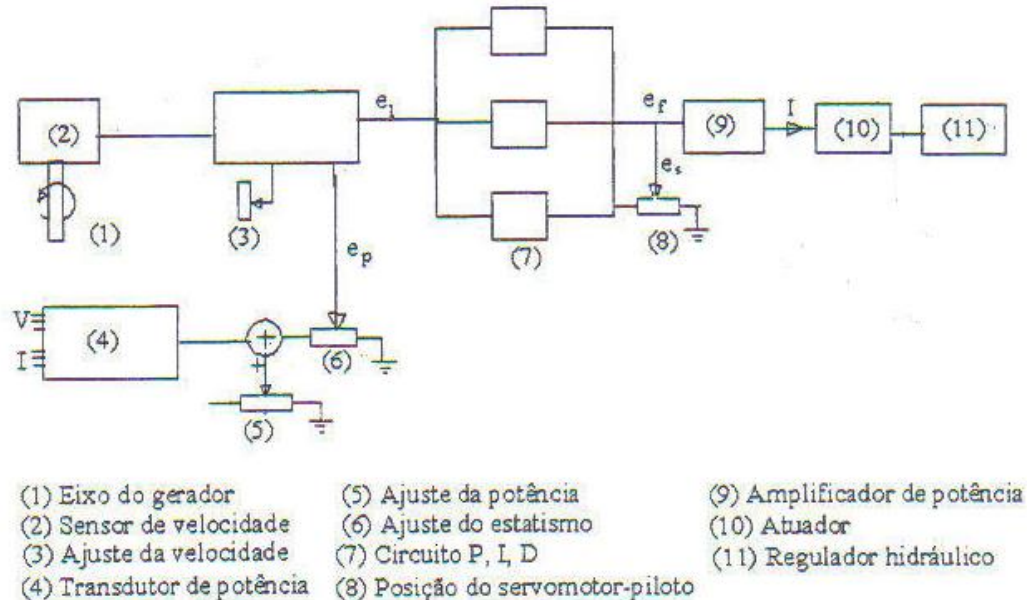


Fonte: Reivax (2012).

O operador também pode alterar manualmente a potência ativa que deve ser gerada. A referência de potência inserida pelo operador é comparada com a potência lida por um transdutor ligado aos TCs e TPs da saída do gerador e a

diferença entre elas é chamada de desvio de potência. Na Figura 2.3 são mostradas todas as etapas que compreendem o funcionamento do regulador de velocidade.

Figura 2.3: Etapas de funcionamento do RV.



Fonte: MCQ (2013).

Em ambos os casos, os desvios identificados pelo circuito são enviados para o atuador para que seja convertido numa ação mecânica de valor proporcional até eliminar essa diferença.

A unidade hidráulica recebe o comando do atuador e dispositivos mecânicos acionados por óleo pressurizado produzem a movimentação do anel do distribuidor que controla abertura ou fechamento do conjunto de palhetas, regulando a entrada de água.

## 2.2 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as particularidades da planta onde foi observada a falha, aprofundando até o funcionamento do equipamento que é o objeto de estudo desse trabalho.

Essa introdução é pertinente para situar o leitor e destacar a importância do Regulador de Velocidade no sistema responsável pela geração de energia e que, caso falhe, a produção pode ser interrompida.

O detalhamento dos elementos que compõe o RV e suas funções aumenta a complexidade e as possibilidades de fontes causadores da falha.

Para dar continuidade ao estudo, o Capítulo 3 irá apresentar a teoria da confiabilidade necessária para realizar o tratamento dos dados, obter as métricas de confiabilidade e interpretar os resultados.



### 3 MÉTRICAS DE CONFIABILIDADE

Esse capítulo apresentará a teoria da confiabilidade fundamental para a aplicação dos dados coletados e o entendimento dos resultados que serão obtidos. Também serão apresentadas as distribuições de vida que podem ser utilizados na análise e o entendimento de seus respectivos parâmetros, para que a distribuição mais adequada a vida útil do equipamento seja aplicada.

De acordo com a etimologia, a palavra confiabilidade significa “qualidade daquele ou daquilo que é confiável” (MICHAELIS, 2019). Conforme citado no Capítulo 1, confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Num sentido mais completo, Leemis (1995 apud FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009), apresenta que a confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas. Nesse sentido, essa definição é a que melhor satisfaz o intuito desse trabalho.

O estudo da confiabilidade tornou-se fundamental para conhecer o desempenho dos equipamentos, considerando que há uma grande complexidade em obter com exatidão seus dados de vida, permitindo precisar melhor o tempo de garantia, por exemplo. (PAIVA SANTANA, 2016).

A confiabilidade sempre estará associada a um período de tempo ou duração de missão e, por ser uma probabilidade, seus valores estarão entre 0 e 1. Para a avaliação dos resultados, deve-se definir uma unidade de tempo para configurar a confiabilidade de um item (período da análise).

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), na década de 70 houve um crescimento da aplicação da confiabilidade nas seguintes áreas:

- Segurança e análises de riscos;
- Qualidade;
- Melhoria dos processos de manutenção;
- Preservação ambiental;
- Projeto de produtos.

Segundo Andrade (2007), para realizar um estudo de confiabilidade são necessários os dados estatísticos de falha (tempo entre falhas e quantidade de falhas) e operação dos componentes e sistemas. Com os dados organizados é necessário aplicá-los em um modelo matemático que mais se adeque ao comportamento de falhas do item em estudo. Os gráficos com as métricas associadas à confiabilidade podem ajudar na análise.

### 3.1 DADOS

Para o início de qualquer estudo é necessário buscar e tratar os dados do sistema. Esses dados podem ser obtidos em bancadas de ensaios ou em campo com os registros de falhas do equipamento.

A organização e classificação dos dados são muito importantes no processo de estimativa da confiabilidade. Para realizar um tratamento estatístico, os dados são tratados como variáveis (SILVESTRE, 2007).

#### 3.1.1 Variáveis aleatórias

Uma variável aleatória é um valor que é determinado pelo resultado de um evento aleatório. Matematicamente, é a variável que assume um valor real a cada elemento do espaço amostral (DEVORE, 2011).

Segundo Fávero e Belfiore (2017), as variáveis aleatórias se dividem em dois grupos: as discretas e as contínuas. A variável aleatória discreta tem seus valores pertencentes a um espaço amostral discreto. Isto é, o número de valores possíveis que a variável pode assumir (domínio) é enumerável. Geralmente são dados de contagem como número de falhas de um componente, total de itens com defeito de uma amostra, etc. Já a variável aleatória contínua é aquela que os valores pertencem a um espaço amostral contínuo. Ou seja, o domínio da variável é um conjunto não numerável. De modo geral são dados de mensuração como o diâmetro de um eixo ou o peso de uma peça, por exemplo.

### 3.2 INDICADORES DE MANUTENÇÃO (MTTF E MTBF)

Como não é possível definir com precisão o desempenho de um equipamento, ou seja, quando ele estará funcionando adequadamente ou quando irá falhar, os momentos em que as falhas ocorrem são classificados como variáveis aleatórias contínuas, para o tratamento estatístico (MAGALHÃES, 2006).

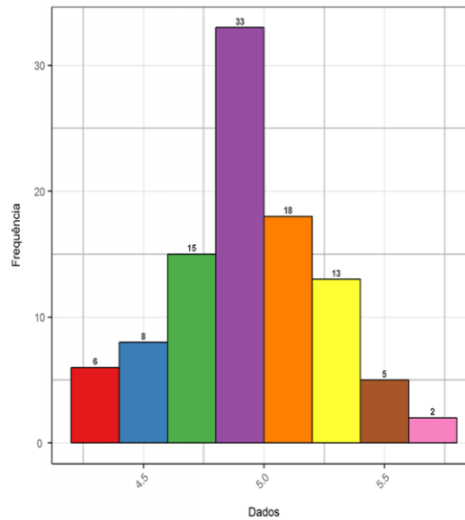
Fogliatto e Ribeiro (2009) definem o MTTF (*mean time to failures*) ou tempo até falha como o tempo entre o início da operação do equipamento ( $t = 0$ ) até a primeira falha, para um sistema não reparável, isto é, sistemas que podem falhar uma única vez e não há reparo, apenas substituição.

No caso de um sistema reparável, o indicador é o tempo médio entre falhas ou MTBF (*mean time between failures*) que é a média de tempo transcorrido entre uma falha e outra. Quanto maior o indicador MTBF, melhor o desempenho do sistema, pois se o tempo entre falhas é alto significa que cada vez menos falhas estão ocorrendo. Esse é o indicador que será utilizado nesse trabalho já que o sistema em estudo é reparável.

### 3.3 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) E PROBABILIDADE ACUMULADA DE FALHA (CDF)

Agrupando os valores numéricos aleatórios de MTBF em classes de frequência é possível distribuí-los em uma representação gráfica chamada de histograma, conforme é apresentado na Figura 3.1.

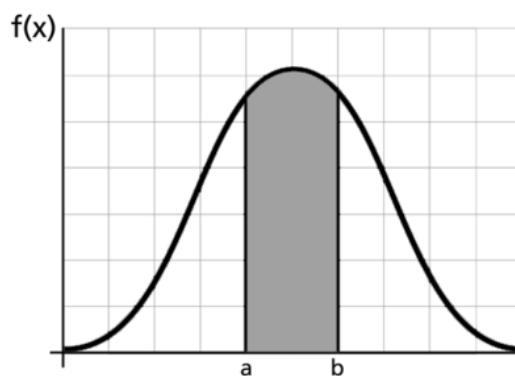
Figura 3.1: Histograma



Fonte: Portal Action (2019).

Conforme Reliawiki (2019a), a envoltória do histograma é a função de densidade de probabilidade ou pdf (*probability density function*), denotada como  $f(x)$  para uma variável aleatória contínua  $X$ . Para dois valores  $a$  e  $b$ , com  $a < b$ , tem-se:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (1)$$

Figura 3.2: Função probabilidade de falha entre  $a$  e  $b$ .

Fonte: Reliawiki (2019a).

Na Figura 3.2 é possível observar que a probabilidade de um valor ocorrer entre  $a$  e  $b$  é igual a área compreendida nesse intervalo abaixo da função densidade (LAFRAIA, 2001).

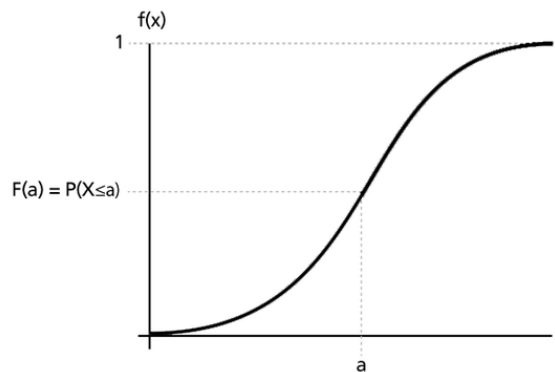
A probabilidade acumulada de falha ou cdf (*cumulative distribution function*) é usada para estimar a probabilidade de que o item em questão falhará até um tempo determinado  $t$  (RELIAWIKI, 2019a).

Para obter os valores cumulativos de falha a partir da  $f(x)$ , basta calcular a área abaixo da curva, ou seja, integrar  $f(x)$  até o tempo  $t$ , obtendo o  $F(t)$ :

$$F(t) = P(X \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx \quad (2)$$

Ou seja, para uma variável aleatória  $t$ , a probabilidade de que o valor  $X$  seja no máximo  $t$  é em  $F(t)$ . Na Figura 3.3 está a curva que representa Função Probabilidade Acumulada de Falha.

Figura 3.3: Função Probabilidade Acumulada de Falha.



Fonte: Reliawiki (2019a).

De acordo com Reliasoft (2019), a probabilidade acumulada de falha (cdf) é a área abaixo da função densidade de probabilidade até um tempo determinado. Para a área total abaixo da pdf teremos a cdf igual a 1, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (3)$$

As funções densidade de probabilidade (pdf) e probabilidade acumulada de falha (cdf) são as funções estatísticas mais importantes para o estudo de confiabilidade. A partir delas é possível obter a maioria dos outros indicadores de confiabilidade.

### 3.4 FUNÇÃO CONFIABILIDADE $R(x)$

A função confiabilidade  $R(x)$  é a probabilidade acumulada do equipamento ou sistema não falhar (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A Confiabilidade e a Probabilidade Acumulada de Falha são complementares, ou seja:

$$R(x) + F(x) = 1 \quad (4)$$

Utilizando a definição da cdf apresentada em (2), que é a a probabilidade acumulada de ocorrer uma falha e substituindo em (4), tem-se:

$$R(x) + \int_{-\infty}^x f(s) ds = 1 \quad (5)$$

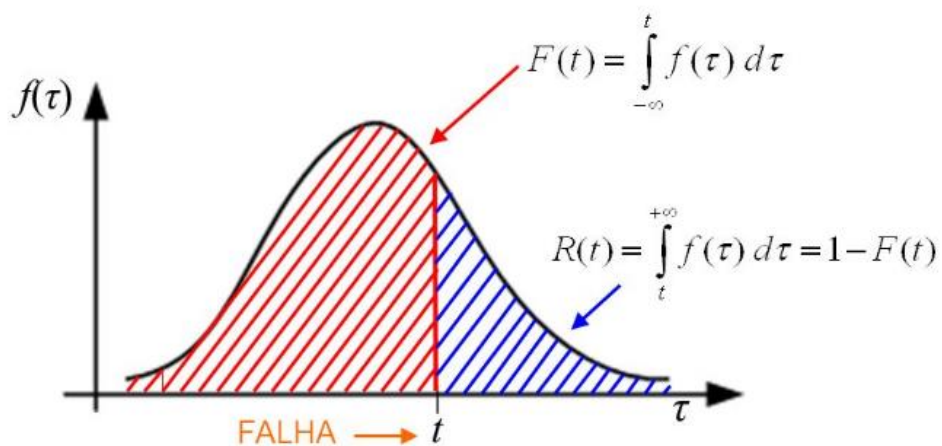
Ou ainda,

$$R(x) = 1 - \int_{-\infty}^x f(s) ds \quad (6)$$

$$R(x) = \int_x^{\infty} f(s) ds \quad (7)$$

A equação (7) é a função de confiabilidade que fornece a probabilidade de sucesso de um equipamento ou sistema para um determinado período de tempo (RIGONI; MARIANO, 2018a).

Figura 3.4: Probabilidade de falha até o tempo  $a$  e probabilidade de sucesso (confiabilidade) a partir de  $a$ .



Fonte: Amaral (2009).

A Figura 3.4 mostra a probabilidade de falha de um item até o tempo “a” e o seu complementar é a probabilidade de não falhar, ou seja, a confiabilidade (AMARAL, 2009).

### 3.5 FUNÇÃO TAXA DE FALHA $\lambda(x)$

Conforme Lewis (1996), a função taxa de falha possibilita definir o número de falhas que ocorrem por unidade de tempo. Matematicamente tem-se:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} \quad (8)$$

Esse cálculo fornece a taxa de falha instantânea, também chamada de função de risco. Conhecer a taxa de falha é útil para descrever o comportamento de falha de um componente, traçar a melhor estratégia de manutenção quanto a alocação da equipe de manutenção, suprimento de peças sobressalentes e etc., evitando a aplicação de atividades desnecessária ou ineficazes (MENDES; RIBEIRO, 2014).

### 3.6 MODELOS PROBABILÍSTICOS

De acordo com Garfield (2002), pensar estatisticamente significa interpretar e representar apropriadamente um conjunto de dados. Os modelos probabilísticos usam os dados de falha reais para descrever o comportamento de um equipamento ou sistema e os mais utilizados para dados contínuos são chamados de distribuições de vida.

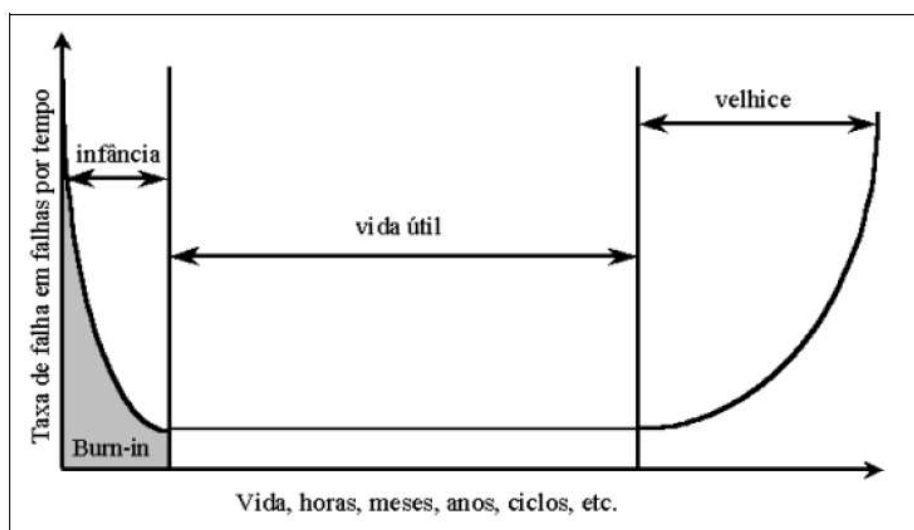
As distribuições permitem estimar a taxa de falha, que é a relação da função densidade de probabilidade pela e da função probabilidade acumulada de falha (LEWIS, 1996).

#### 3.6.1 Curva da banheira

A curva da banheira descreve o comportamento da taxa de falha em relação ao tempo, que representa as fases de vida de um equipamento, que se inicia com um alto índice de falha, seguidas de desgaste por uso (MATOS; ZOTTI 2010).

Segundo Lafraia (2001), se a taxa de falha for decrescente em relação ao tempo, as falhas são chamadas de prematuras, localizadas na primeira fase da curva da banheira. Se a taxa de falhas for constante, as falhas são do tipo aleatórias, estando na segunda fase da curva da banheira. Se a taxa de falha tiver característica crescente então as falhas são por desgaste, ficando na última fase da curva da banheira, conforme Figura 3.5:

Figura 3.5: Curva da banheira idealizada.



Fonte: Matos; Zotti (2010).

Conhecer a curva da banheira é importante para a engenharia de confiabilidade, pois permite observar a característica das falhas que o equipamento vem sofrendo (LAFRAIA, 2001).

Conforme Pallerosi (2007), as principais distribuições utilizadas pelo estudo de Confiabilidade são: Exponencial, Normal, Lognormal, e Weibull e serão apresentadas a seguir:

### 3.6.2 Distribuição Exponencial

Essa distribuição é comumente usada para modelar comportamentos de taxa de falha constante e, por sua simplicidade, muitas vezes é aplicada inadequadamente (RELIAWIKI, 2019b).



Conforme Montgomery e Runger (2016), a função densidade de probabilidade para a distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (9)$$

Onde:

- $t$  é a variável que representa o tempo entre falhas;
- $\lambda$  é o parâmetro da distribuição, que pode dar aspectos diferentes à função, dependendo do seu valor. Esse parâmetro é estimado a partir dos dados de falha.

### 3.6.3 Distribuição Normal (desgaste)

De acordo com Reliawiki (2019c), a distribuição normal que é também conhecida como distribuição gaussiana, é a mais utilizada para análise de geral de confiabilidade e de dados de vida, sendo útil para calcular tempos de falha de componentes ou sistemas eletrônicos e mecânicos simples. A pdf dessa distribuição é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (10)$$

Em que:

- $\mu$  é a média dos tempos até falha;
- $\sigma$  é o desvio padrão dos tempos até falha.

### 3.6.4 Distribuição Lognormal

Em geral, essa distribuição descreve taxas de falhas prematuras e por desgaste, utilizada para análise de geral de confiabilidade geral, ciclos de falha em fadiga, resistência de materiais e variáveis de carga (CARTER, 1986).

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), trata-se de situações em que a probabilidade de completar o reparo aumenta com o passar do tempo. Pode ser ocasionado por falta de conhecimento dos envolvidos para execução do serviço ou até falta de matérias-primas.

Os dados seguem particularmente essa distribuição quando os logaritmos dos tempos de falha são normalmente distribuídos e a pdf da distribuição lognormal é dada pela equação (MONTGOMERY; RUNGER, 2016):

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t'-\mu'}{\sigma'}\right)^2} \quad (11)$$

Onde:

- $\mu'$  é a média dos logaritmos naturais de tempos até falha;
- $\sigma'$  é o desvio padrão dos logaritmos naturais dos tempos até falha.

### 3.6.5 Distribuição Weibull

Essa distribuição foi proposta W. Weibull em 1954, inicialmente para estudos relacionados ao tempo de falha de metais em função da fadiga.

É uma das distribuições mais usadas por apresentar uma grande variedade de formas e seus parâmetros permitirem flexibilidade de modelagem tal que sua função de taxa de falha pode ser crescente, decrescente ou constante. Sua versatilidade possibilita assumir o papel de outras distribuições, de acordo com o valor assumido por  $\beta$  (RELIAWIKI, 2019d).

De acordo com Freitas e Colossimo (1997), é adequada para descrever a vida de produtos industriais como componentes eletrônicos, cerâmicas, capacitores e dielétricos.

Conforme Reliasoft (2019), o caso mais geral é a distribuição Weibull de 3 parâmetros e a pdf é definida pela equação:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (12)$$

Em que:

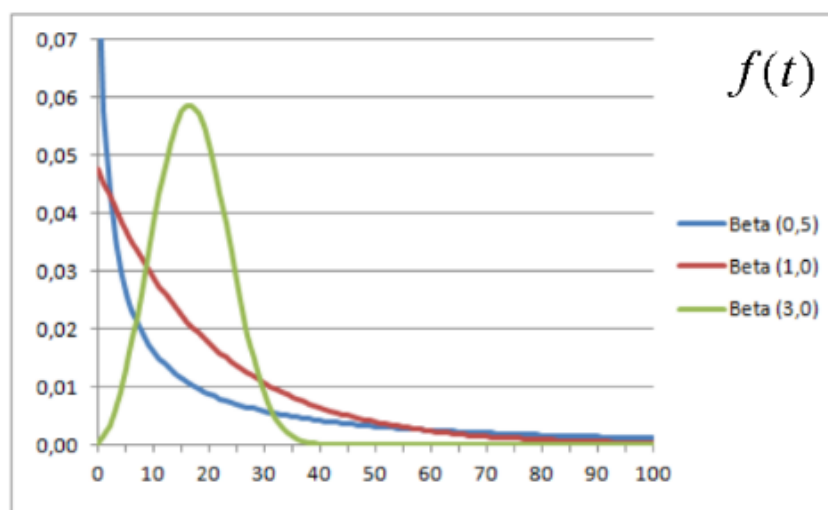
- $\beta$  é o parâmetro de forma e é responsável pela inclinação da distribuição. Isto é, ao variar  $\beta$  a equação de Weibull poderá representar uma curva típica de falhas prematuras, de falhas aleatórias ou de falhas por desgastes. O Quadro 3.1 mostra qual o comportamento da taxa de falhas em relação ao valor de  $\beta$ :

Quadro 3.1: Comportamento da função de taxa de falha em função do valor de  $\beta$ .

$\beta$	Comportamento
<1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de falha decrescente;</li> <li>• Primeira fase da curva da banheira;</li> <li>• Falhas prematuras ou mortalidade infantil.</li> </ul>
=1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de falha constante;</li> <li>• Segunda fase da curva da banheira;</li> <li>• Falhas aleatórias.</li> </ul>
>1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de falha crescente;</li> <li>• Terceira da fase da curva da banheira;</li> <li>• Falhas por desgaste.</li> </ul>
=3,2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caso específico em que a distribuição aproxima-se da distribuição normal.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de LAFRAIA (2001).

A Figura 3.6 mostra a influência do valor de  $\beta$  na função densidade de probabilidade (RIGONI; MARIANO, 2018b).

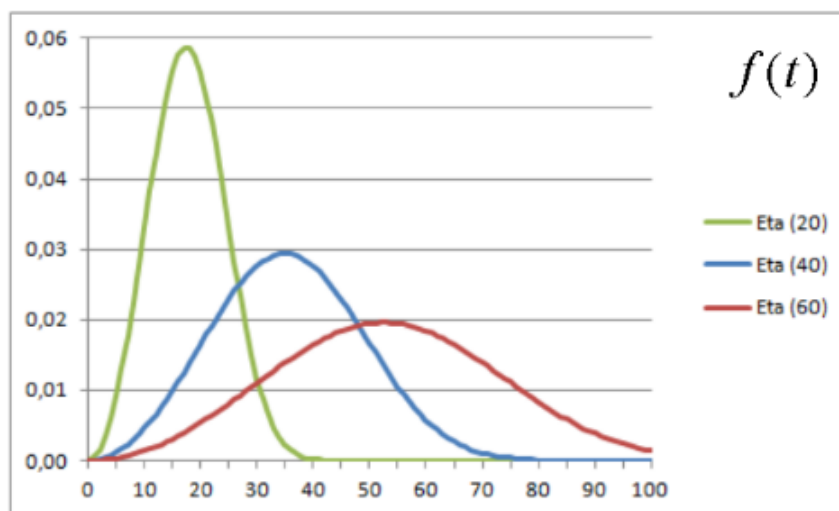
Figura 3.6: Influência de  $\beta$  na função densidade de probabilidade de Weibull.

Fonte: Rigoni; Mariano, 2018b.

- $\eta$  é o parâmetro de escala ou vida característica. Expressa o período de vida para que 63,2% de falhas ocorram. Em relação à confiabilidade, é o mesmo que dizer que existe 37% de itens que não falharam até o tempo  $\eta$ . Na Figura

3.7 é possível observar a influência de  $\eta$  na função densidade de probabilidade (RELIASOFT, 2019).

Figura 3.7: Influência de  $\eta$  na função densidade de probabilidade de Weibull.



Fonte: Rigoni; Mariano, 2018b.

- $\gamma$  é o parâmetro de locação ou vida mínima. Representa o tempo em que o sistema não apresenta falha e, por isso, sempre será menor do que o valor mais baixo dos dados coletados. Quando  $\gamma$  é igual a zero, temos uma distribuição Weibull de 2 parâmetros (RELIASOFT, 2019);

### 3.7 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Esse capítulo abordou a teoria que embasa as métricas de confiabilidade que serão analisadas nesse estudo. Foram apresentadas as funções fundamentais no estudo de confiabilidade (função densidade de probabilidade, probabilidade acumulada de falha, função confiabilidade e taxa de falha), e os modelos probabilísticos mais comuns além de como aplicá-los adequadamente com base na característica de vida (curva da banheira).

O estudo da teoria da confiabilidade é essencial para que os dados levantados sejam tratados e utilizados corretamente. Além disso, a compreensão dos conceitos propicia uma interpretação coerente dos resultados que serão obtidos.

O capítulo seguinte mostrará os resultados obtidos no *software* partir dos dados coletados e uma análise comparativa entre os anos de 2016, 2017 e 2018.

## 4 TRATAMENTO DOS DADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, os dados de falha coletados serão tratados e inseridos no *software* Weibull++ da ReliaSoft para início da análise. Será selecionada a distribuição que tenha mais aderência aos dados e estimados os parâmetros significativos para a pesquisa. Também serão apresentados os resultados obtidos para funções de densidade de probabilidade (pdf), probabilidade acumulada de falha (cdf), confiabilidade  $R(x)$  e taxa de falha  $\lambda(x)$  para os anos de 2016, 2017 e 2018;

Conforme citado no Capítulo 2, a empresa contratada para realizar a manutenção da usina iniciou um controle das falhas gerando o histórico que foi utilizado nesse trabalho. Os dados foram agrupados em base anual por ser um critério adotado pela empresa para apresentação de resultados ao cliente e avaliação de desempenho da manutenção.

Depois de identificado como prioritário o tratamento das falhas no Regulador de Velocidade da UG2, conforme critérios apresentados no Capítulo 1, a primeira ação para traçar as métricas de confiabilidade, foi levantar os tempos entre falhas (MTBF) do RV.

### 4.1 DADOS DO ANO DE 2016

O levantamento das falhas ocorridas no ano de 2016 e os tempos médios entre falhas são mostrados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2016:

Saída	Retorno	Tempo Total	Possível Causa	MTBF
23/03/2016 04:45	23/03/2016 07:03	02:18	Indefinida	
27/03/2016 15:26	27/03/2016 15:37	00:11	Indefinida	104,38
27/03/2016 17:59	27/03/2016 18:15	00:16	Indefinida	2,36
27/03/2016 19:13	27/03/2016 19:24	00:11	Indefinida	0,96
27/03/2016 23:07	27/03/2016 23:39	00:32	Indefinida	3,71
27/03/2016 23:50	28/03/2016 00:19	00:29	Indefinida	0,18
28/03/2016 03:35	28/03/2016 03:45	00:10	Indefinida	3,26
28/03/2016 04:13	28/03/2016 04:28	00:15	Indefinida	0,46
30/03/2016 13:47	30/03/2016 22:40	08:53	Indefinida	57,31
09/04/2016 06:16	09/04/2016 06:50	00:34	Desajuste	223,6

11/04/2016 10:18	11/04/2016 14:14	03:56	Desajuste	51,46
28/04/2016 16:01	28/04/2016 16:11	00:10	Desajuste	-
28/04/2016 16:11	28/04/2016 16:24	00:13	Desajuste	409,78
28/04/2016 16:46	28/04/2016 21:46	05:00	Desajuste	0,36
02/05/2016 10:56	02/05/2016 11:09	00:13	Desajuste	-
02/05/2016 11:10	02/05/2016 11:37	00:27	Desajuste	85,16
15/06/2016 13:36	15/06/2016 15:06	01:30	Emperramento	1057,98

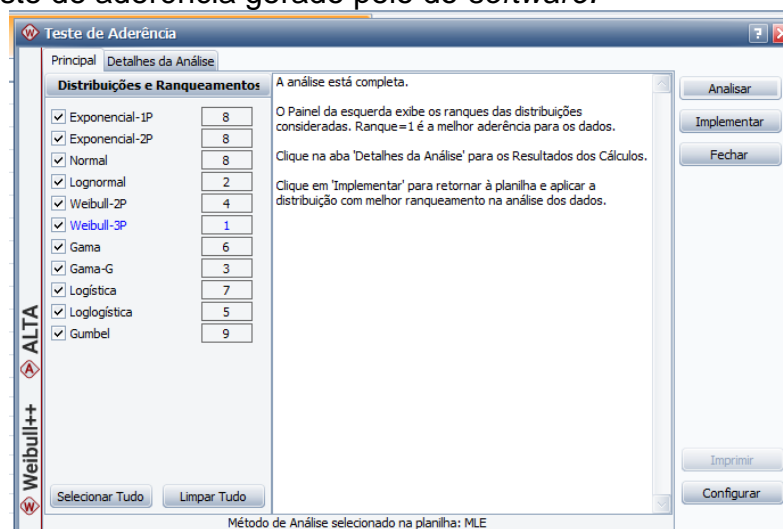
Fonte: a autora (2019).

Para o tratamento dos dados foram adotadas as premissas:

- O sistema é reparável (por isso o levantamento mostra o tempo entre falhas – MTBF);
- A base de dados está apresentada em horas;
- A observação dos dados inicia no dia 01/01/2016;
- Não há dados censurados nessa coleta;
- Não há MTBF quando o a falha ocorreu logo após a sincronia da máquina.

Esses dados foram inseridos no *software* Weibull++ da Reliasoft, o qual oferece uma ferramenta chamada de “Assistente de Distribuição” que verifica qual distribuição terá a melhor aderência aos dados. O teste apontou a distribuição Weibull-3P (3 parâmetros) como a mais adequada para o estudo e essa foi implementada. A Figura 4.1 mostra a sugestão dada pelo assistente.

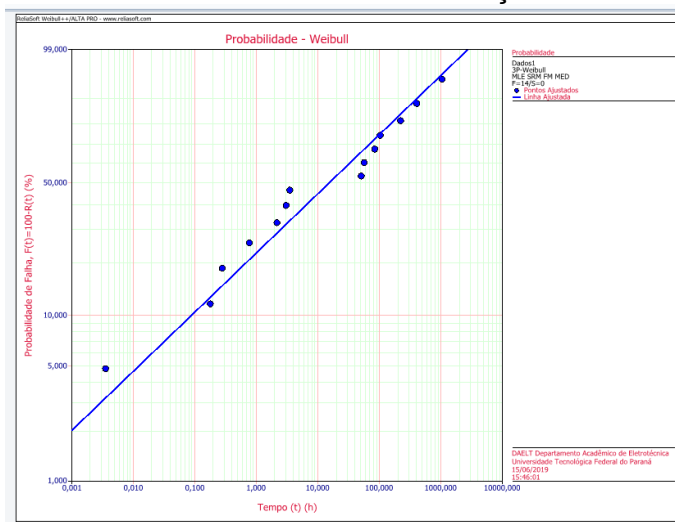
Figura 4.1: Teste de aderência gerado pelo do *software*.



Fonte: a autora (2019).

A distribuição sugerida pelo *software* foi implementada e o gráfico de Probabilidade para a distribuição mostrou a aderência dos dados para esse modelo, conforme Figura 4.2.

Figura 4.2: Aderência dos dados de 2016 na distribuição Weibull-3P.



Fonte: a autora (2019).

Dessa forma, os parâmetros para a distribuição Weibull 3P foram calculados pela ferramenta QCP (*Quick Calculation Pad*) conforme mostra o Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Parâmetros calculados para os dados de falha de 2016.

<b>Relatório de Resultados</b>	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	11/06/2019
<b>Parâmetros</b>	
Distribuição	Weibull 3P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	0,365162
Eta (h)	41,67851
Gama (h)	0,179425
Valor da LK	-66,066351
F \ S	14 \ 0

Fonte: a autora (2019).



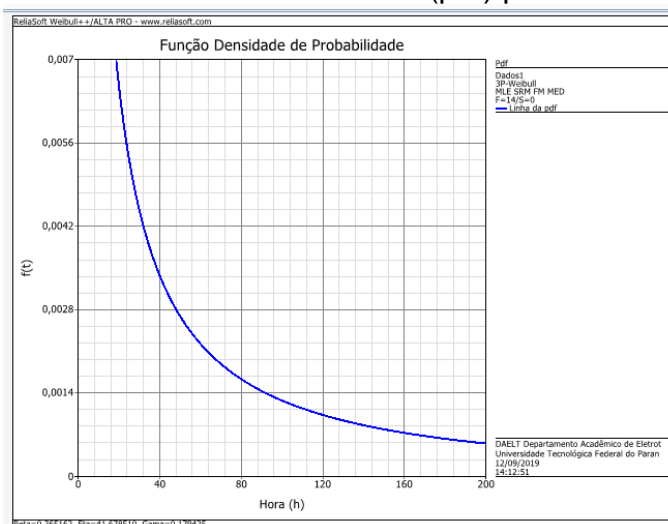
De acordo com Rigoni e Mariano (2018a), o parâmetro  $\beta$  (Beta) modela a inclinação da equação Weibull que pode representar uma curva típica de falhas prematuras, de falhas aleatórias ou de falhas por desgastes, assumindo alguma das fases da curva da banheira. Nessa análise, o parâmetro  $\beta$  resultou em 0,365162. Quando tem-se  $\beta < 1$ , a taxa de falha é decrescente, característico de falhas prematuras (LAFRAIA, 2001).

O parâmetro  $\eta$  (Eta), ou vida característica, é o tempo para que 63,2% de itens de um conjunto irão falhar. Nesse caso obteve-se 41,67 horas para que o sistema apresente até 63,2% das falhas.

A vida mínima, representada pelo parâmetro  $\gamma$  (Gama) indica o tempo em que o sistema não apresenta falha. Nesse caso obtemos é 0,179425 horas, ou seja, em até 10 minutos de funcionamento o equipamento não vai falhar.

A Figura 4.3 mostra a função densidade de probabilidade (pdf) e é possível observar que a maioria das falhas aconteceu no início da operação, o que comprova que as falhas são do tipo prematuras.

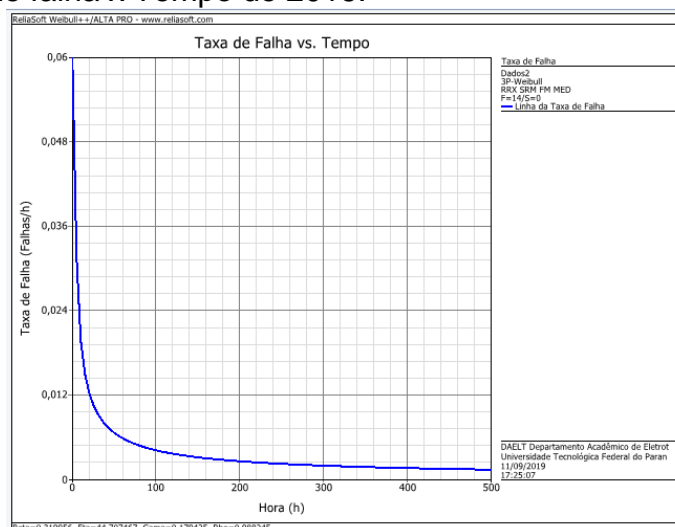
Figura 4.3: Função Densidade de Probabilidade (pdf) para o ano de 2016.



Fonte: a autora (2019).

Além disso, o gráfico de taxa de falhas, mostrada na Figura 4.4, tem comportamento decrescente, característico da primeira fase da curva da banheira.

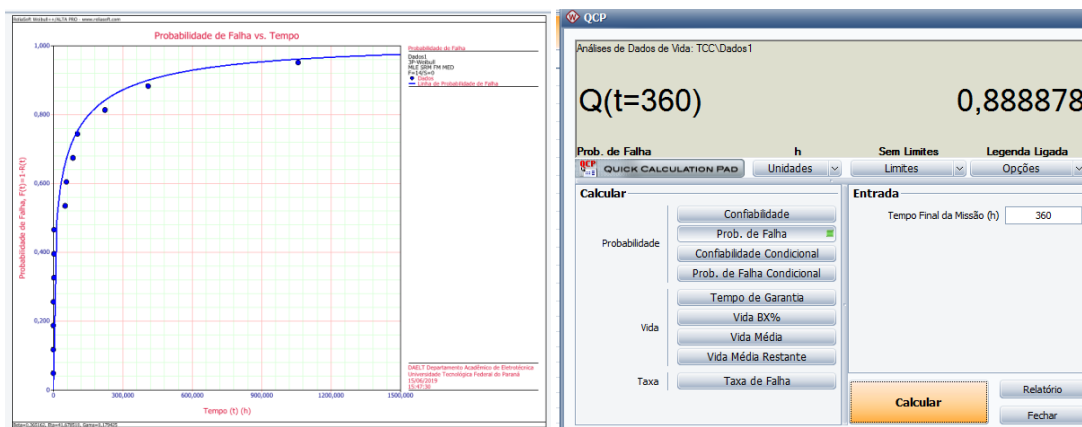
Figura 4.4: Taxa de falha x Tempo de 2016.



Fonte: a autora (2019).

Na Figura 4.5 é possível observar que a probabilidade acumulada de falhas é crescente e relação ao tempo com os dados de falha em maior densidade em até 300 horas. Nessa situação, foi estabelecida uma missão de 360 horas para calcular a probabilidade de falha, obtendo 88,88%.

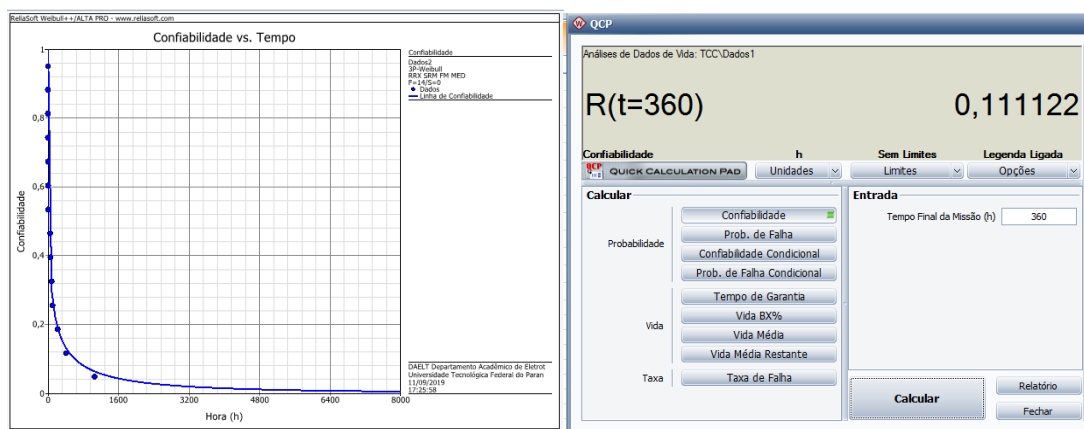
Figura 4.5: Curva da Probabilidade acumulada de Falha x Tempo para o ano de 2016 e valor da probabilidade de falha para uma missão de 360 horas.



Fonte: a autora (2019).

Como apresentado no Capítulo 3, a confiabilidade tem comportamento complementar à probabilidade de falha, pois é a probabilidade do item não falhar. Na Figura 4.6 é possível observar esse comportamento, em que a confiabilidade é decrescente em relação ao tempo, e para uma missão de 360 horas o valor obtido foi de 11,12%, isto é, 11,12% de chances do item não falhar.

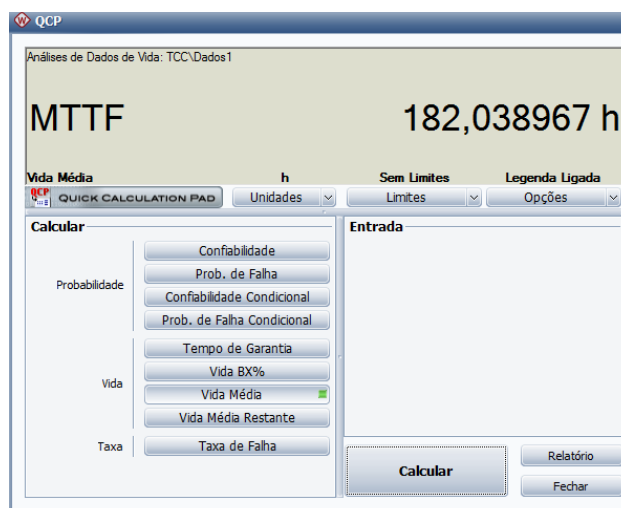
Figura 4.6: Confiabilidade x Tempo para o ano de 2016 e valor da confiabilidade para uma missão de 360 horas.



Fonte: a autora (2019).

Outro indicador importante a ser verificado é o tempo médio entre falhas ou MTBF (estamos considerando esse sistema como reparável), que é a média de tempo transcorrido entre uma falha e outra, conforme já explicado no Capítulo 3. O valor obtido para o ano de 2016 é mostrado na Figura 4.7:

Figura 4.7: Valor calculado de MTTF (equivalente ao MTBF adotado no estudo) referente a 2016.



Fonte: a autora (2019).

O MTBF obtido para o ano de 2016 foi de 182 horas e esse valor será utilizado na comparação com o resultado dos outros anos para verificar se houve melhoria no sistema.

## 4.2 DADOS DO ANO DE 2017

Considerando que “toda falha é um acontecimento indesejável e deve ser considerada uma situação anormal, que precisa de tratamento adequado para que não volte a ocorrer” (XENOS, 2005), a equipe de manutenção buscou encontrar as causas raízes, utilizando um método de análise de falhas, afim de tomar ações para eliminar os causadores das falhas e evitar a reincidência. Essa medida é feita de forma cíclica, ou seja, conforme as falhas vão acontecendo, elas já são tratadas, seguindo a política da empresa. Por isso, no decorrer dos anos estudados (2016, 2017 e 2018) muitas intervenções foram realizadas e muitas falhas foram sanadas, o que não ocorre de forma pontual, em um único mês ou ao final de cada período analisado. A escolha dos dados serem analisados anualmente é a forma adotada pela empresa prestadora de serviço de O&M apresentar os resultados para o cliente, conforme já citado no início do capítulo.

Os dados de falha coletados para o ano de 2017 estão mostrados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2017.

Saída	Retorno	Tempo Total	Possível Causa	MTBF
23/05/2017 01:59	23/05/2017 02:15	00:16	Projeto	
15/06/2017 13:50	15/06/2017 13:57	00:07	Projeto	563,58
01/07/2017 21:52	02/07/2017 00:32	02:40	Mau Contato	391,91
15/07/2017 10:15	15/07/2017 15:59	05:44	Desgaste	321,71
18/08/2017 15:59	18/08/2017 22:05	06:06	Desgaste	816,00
05/12/2017 11:47	05/12/2017 12:03	00:16	Afrouxamento	2605,70

Fonte: a autora (2019).

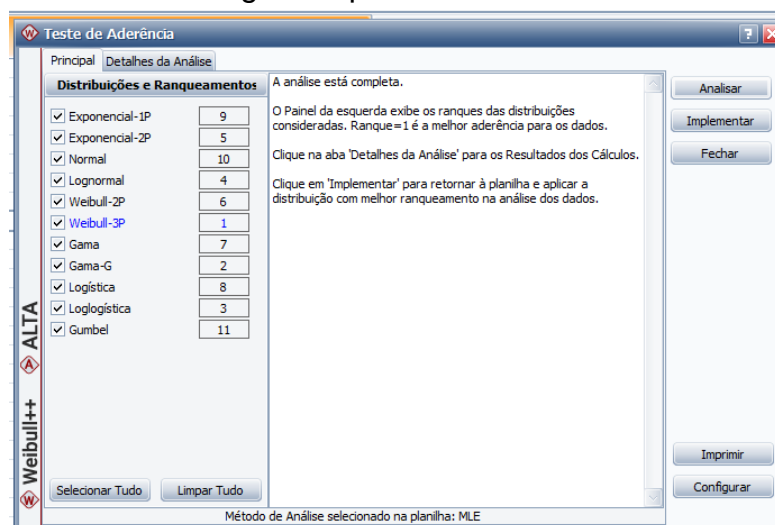
Igualmente como os dados do ano de 2016, esses valores também foram tratados e inseridos no *software* Weibull++ da Reliasoft. As premissas adotadas para a análise de 2016 foram mantidas para a análise de 2017:

- O sistema é reparável (por isso o levantamento mostra o tempo entre falhas – MTBF);
- A base de dados está apresentada em horas;
- A observação dos dados inicia no dia 01/01/2017;

- Não há dados censurados nessa coleta.

Conforme análise anterior, o assistente de distribuição do *software* indicou que a distribuição Weibull-3P (3 parâmetros) é a que apresenta maior aderência para esses dados, conforme Figura 4.8. Do ponto de vista da análise comparativa essa é a melhor situação.

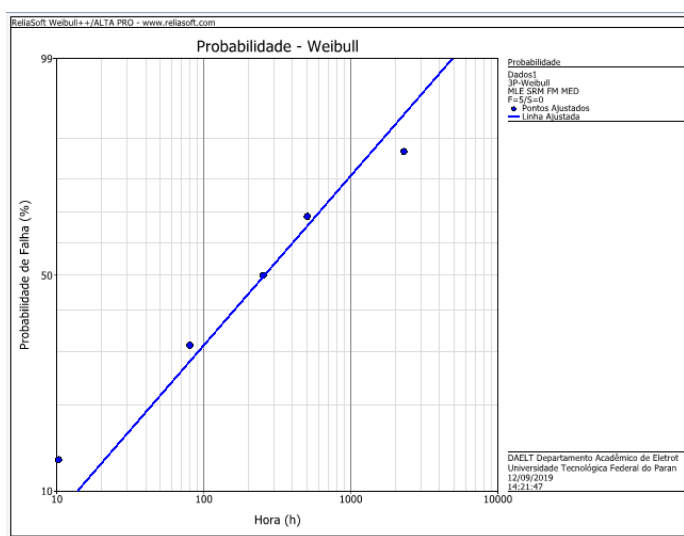
Figura 4.8: Teste de aderência gerado pelo *software*.



Fonte: a autora (2019).

Os dados se mostraram aderentes no gráfico da Probabilidade – Weibull que está na Figura 4.9, o que confirma que o modelo escolhido é adequado.

Figura 4.9: Aderência dos dados de 2017 na distribuição Weibull-3P.



Fonte: a autora (2019).

Novamente foram calculados os parâmetros da distribuição Weibull 3P, através da ferramenta QCP. O Quadro 4.2 nos mostra os resultados:

Quadro 4.2: Parâmetros calculados para os dados de falha de 2017.

<b>Relatório de Resultados</b>	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	11/06/2019
<b>Parâmetros</b>	
Distribuição	Weibull 3P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Ranqueando	MED
Beta	0,642872
Eta (h)	454,714955
Gama (h)	311,45594
Valor da LK	-36,239401
F \ S	5 \ 0

Fonte: a autora (2019).

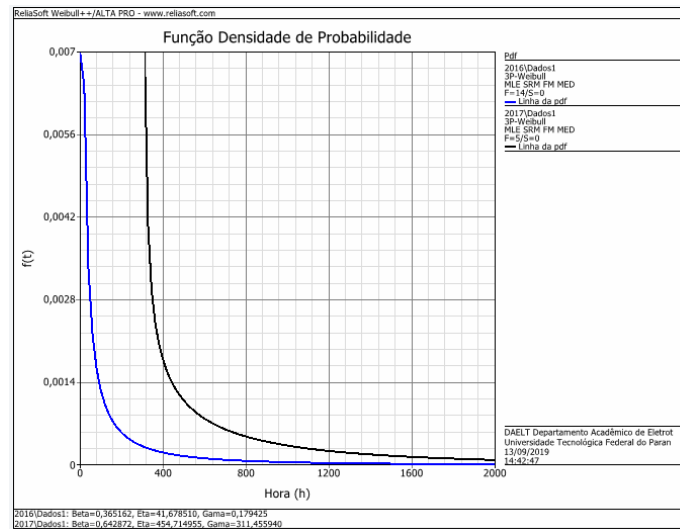
O parâmetro  $\beta$  (Beta) obtido para esses dados foi 0,642872. Esse valor ainda é menor que 1, o que remete a falhas prematuras, porém o valor é maior que o calculado com os dados de 2016, o que sugere que as ações tomadas pela manutenção diminuíram a ocorrência de falhas prematuras.

A vida característica, representado pelo parâmetro  $\eta$  (Eta), subiu para 454,71 horas. Ou seja, o tempo para que ocorram 63,2% das falhas nesse sistema é 454 horas, que era 41,67 horas para o ano anterior.

A vida mínima, indicada pelo parâmetro  $\gamma$  (Gama) passou para 311,45, indicando que após o início da operação, o equipamento só poderá falhar após 311 horas. Isso também distância a característica das falhas como prematuras.

Na Figura 4.10 pode-se observar a influência dos três parâmetros de Weibull na função densidade de probabilidade (pdf).

Figura 4.10: Função Densidade de Probabilidade (pdf) com os dados de 2016 e 2017.

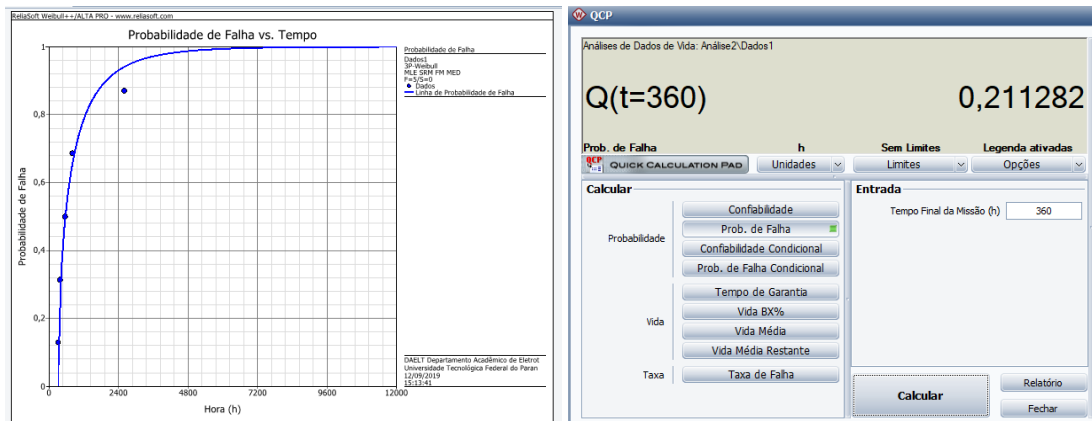


Fonte: a autora (2019).

Apesar do valor de  $\beta$  ter subido, ainda ficou menor que 1, o que não altera a inclinação da distribuição. Isto é, as falhas continuam sendo do tipo prematuras. O parâmetro  $\eta$  influencia na amplitude da pdf e por fim o parâmetro  $\gamma$  que é o parâmetro de locação, deslocando a curva para a direita já que o tempo para o equipamento apresentar falhas aumentou.

Para o cálculo da probabilidade acumulada de falhas também foi estabelecida uma missão de 360 horas, em que o valor obtido foi 21,12%, conforme Figura 4.11. A probabilidade de falha para o ano anterior foi de 88%.

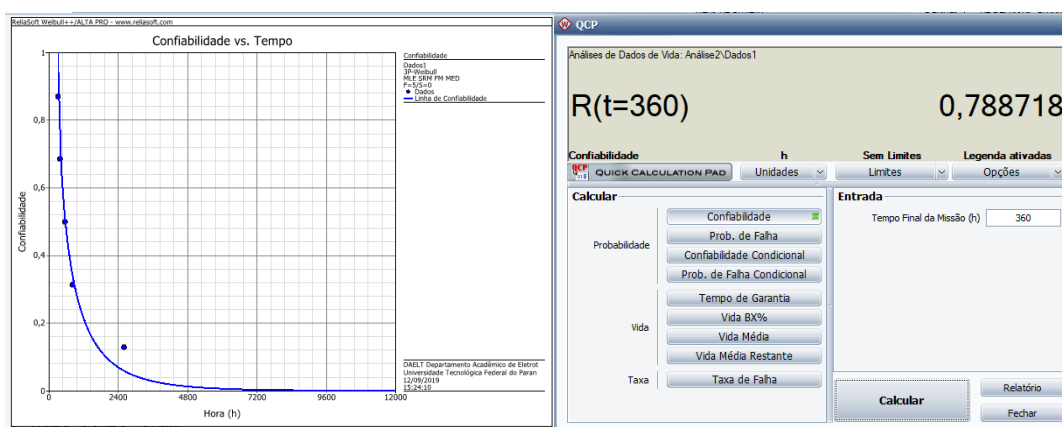
Figura 4.11: Curva da Probabilidade acumulada de Falha x Tempo para o ano de 2017 e valor da probabilidade de falha para uma missão de 360 horas.



Fonte: a autora (2019).

Da mesma forma que o valor obtido para a probabilidade de falha diminuiu, de 88% para 21%, a confiabilidade do sistema aumentou na mesma proporção, conforme Figura 4.12:

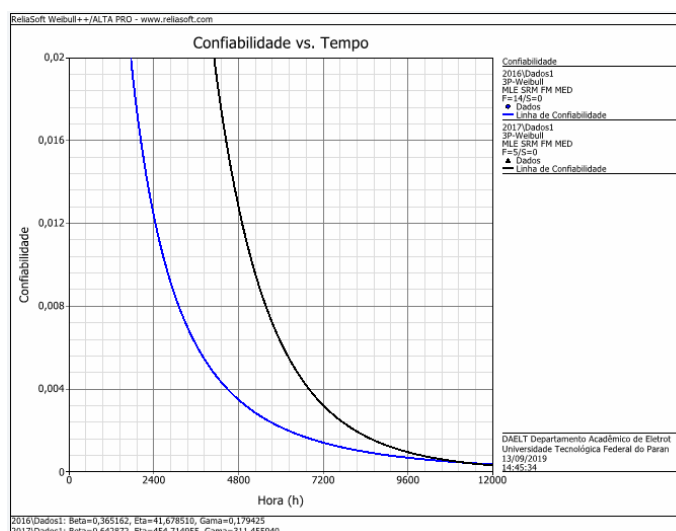
Figura 4.12: Confiabilidade x Tempo de 2017 e valor da confiabilidade para uma missão de 360 horas.



Fonte: a autora (2019).

A confiabilidade do RV, que era de 11% no ano de 2016, passou para 78% no ano de 2017 com as ações tomadas pela manutenção, identificando e tratando as causas raízes das falhas. Na Figura 4.13 também é possível ver esse aumento da Confiabilidade.

Figura 4.13: Confiabilidade x Tempo para os anos de 2016 e 2017.

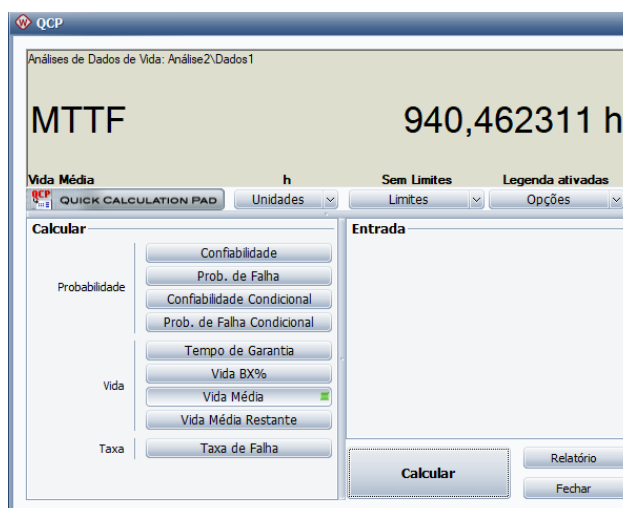


Fonte: a autora (2019).



Comprovando também as melhorias no sistema, o tempo médio entre falhas também aumentou de 182 horas para 940 horas, conforme calculado pelo recurso QCP, vide Figura 4.14:

Figura 4.14: Valor calculado de MTTF (equivalente ao MTBF adotado no estudo) referente a 2017.



Fonte: a autora (2019).

Quanto maior o valor obtido para o MTBF, melhor é o desempenho do sistema, conforme apresentado no Capítulo 3.

### 4.3 DADOS DO ANO DE 2018

No ano de 2018, o contrato da prestadora de serviço foi renovado, mas a equipe de manutenção manteve as manutenções corretivas e preventivas, de forma constante, visando evitar a reincidência de falhas, mantendo o registro das ocorrências que servem para os cálculos de índices de desempenho que são apresentados ao final do ano para cliente. Os registros de falha coletados do ano de 2018 estão apresentados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Levantamento das falhas envolvendo o RV da UG2 no ano de 2018.

Saída	Retorno	Tempo Total	Possível Causa	MTBF
15/01/2018 00:37	15/01/2018 00:45	00:08	Indefinida	
02/05/2018 20:28	02/05/2018 20:40	00:12	Desajuste	2587,71
20/09/2018 10:41	20/09/2018 10:53	00:12	Indefinida	3374,01
19/11/2018 10:45	19/11/2018 13:14	02:29	Queima fusível	1439,86

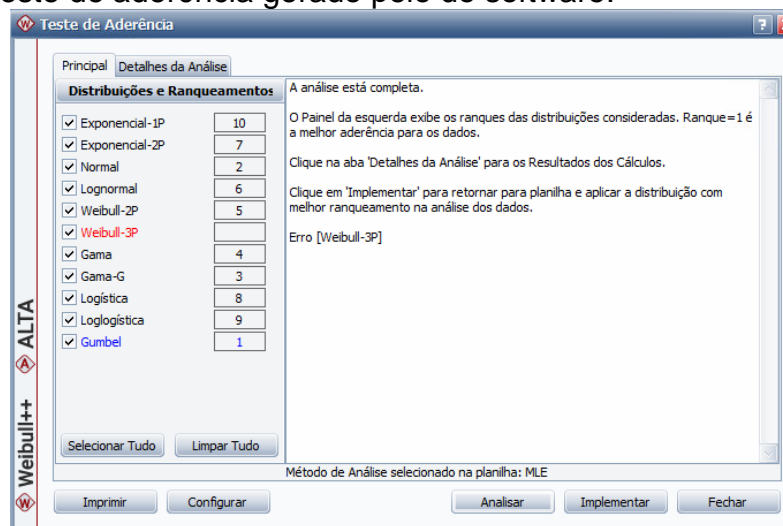
Fonte: a autora (2019).

As premissas consideradas nas análises anteriores foram mantidas:

- O sistema é reparável (por isso o levantamento mostra o tempo entre falhas – MTBF);
- A base de dados está apresentada em horas;
- A observação dos dados inicia no dia 01/01/2018;
- Não há dados censurados nessa coleta.

Os dados de falha foram inseridos no *software* Weibull++ da Reliasoft e o assistente de distribuição mostrou como mais apropriada a distribuição Gumbel. Porém, ao implementar essa distribuição para essa análise, perder-se-ia a base comparativa, já que para esse modelo os parâmetros são outros e não seria possível compará-los com os parâmetros da Weibull-3P. Já o modelo Weibull-3P foi eliminado da ranqueamento, por não atender os requisitos necessários para aplicação dessa distribuição, conforme mostra a Figura 4.15. Nesse sentido, mesmo colocado em quinto lugar na classificação do assistente, foi implementado o modelo Weibull-2P, para que se pudesse manter os parâmetros que serão utilizados na análise comparativa.

Figura 4.15: Teste de aderência gerado pelo do software.

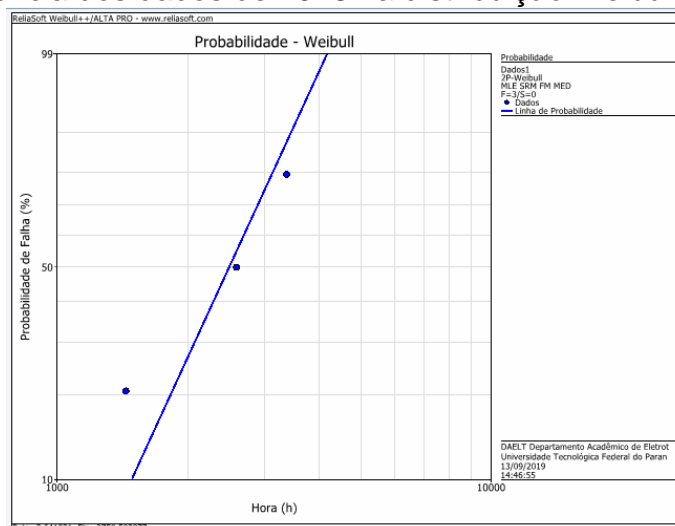


Fonte: a autora (2019).

A distribuição Weibull de 2 parâmetros, aplicada para análise, considera o valor de  $\gamma$  (Gama), que é a vida mínima, como zero. Nesse caso, os parâmetros que teremos para serem analisados serão  $\beta$  (Beta) e  $\eta$  (Eta).

Apesar de não ser sugerida pelo assistente de distribuição, o modelo Weibull-2P mostrou aderência aos dados, conforme pode ser visto na Figura 4.16

Figura 4.16: Aderência dos dados de 2018 na distribuição Weibull-2P.



Fonte: a autora (2019).

Os parâmetros calculados são apresentados no Quadro 4.3:

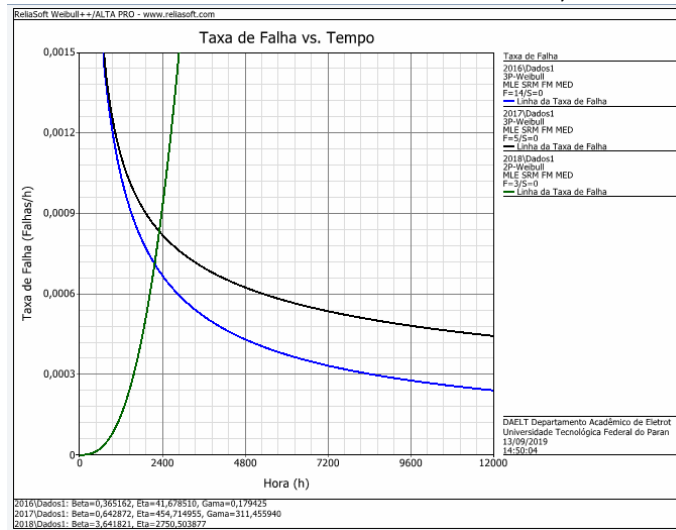
Quadro 4.3: Parâmetros calculados para os dados de falha de 2018.

<b>Relatório de Resultados</b>	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	13/06/2019
<b>Parâmetros</b>	
Distribuição	Weibull 2P
Análises	MLE
Método do IC	FM
Rankeando	MED
Beta	3,641821
Eta (h)	2750,503877
Valor da LK	-24,212451
F \ S	3 \ 0

Fonte: a autora (2019).

Nessa análise, o valor obtido para  $\beta$  foi 3,641821. De acordo com Lafraia (2001), quando se tem  $\beta > 1$ , as falhas ocorrem por desgaste e a taxa de falha é crescente. Essa característica pode ser observada na Figura 4.17, em que são mostradas as curvas de taxa de falhas dos anos de 2016, 2017 e 2018.

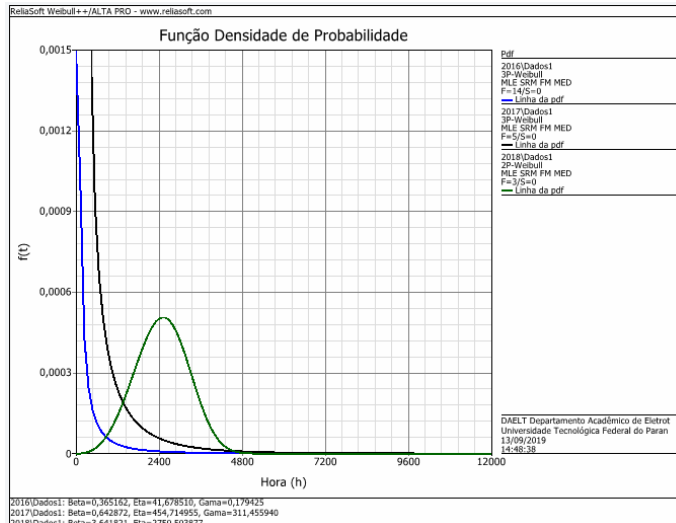
Figura 4.17: Curvas de taxas de falhas dos anos de 2016, 2017 e 2018.



Fonte: a autora (2019).

Conforme já apresentado no Capítulo 3,  $\beta$  é o parâmetro responsável pela inclinação da distribuição. Pode-se observar a influência da variação de  $\beta$  na função densidade de probabilidade de cada ano analisado, mostrado na Figura 4.18:

Figura 4.18: Curvas de função de densidade de probabilidade dos anos de 2016, 2017 e 2018.



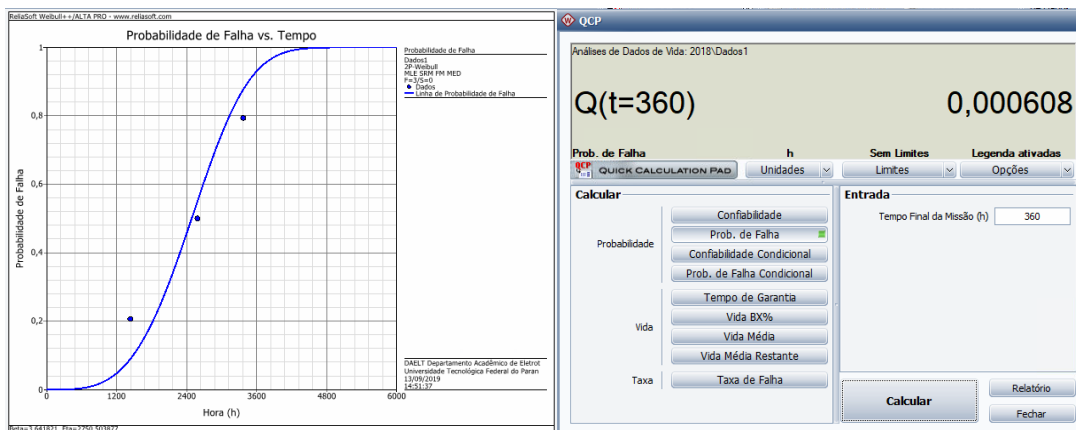
Fonte: a autora (2019).

O parâmetro  $\eta$  (Eta) obtido foi 2750,50 horas. Isso quer dizer que o tempo para que ocorram 63,2% das falhas nesse sistema agora é de 2750:30 horas.

O parâmetro  $\gamma$  para o modelo Weibull-2P é zero, ou seja, o modelo considera que o sistema poderá falhar em qualquer momento após o início da operação.

Os valores de probabilidade acumulada de falhas e confiabilidade do sistema foram calculados novamente, mantendo o tempo de missão de 360 horas. O valor obtido para a probabilidade de falha foi de 0,06% e para confiabilidade foi 99,93%, conforme Figura 4.19 e 4.20 respectivamente.

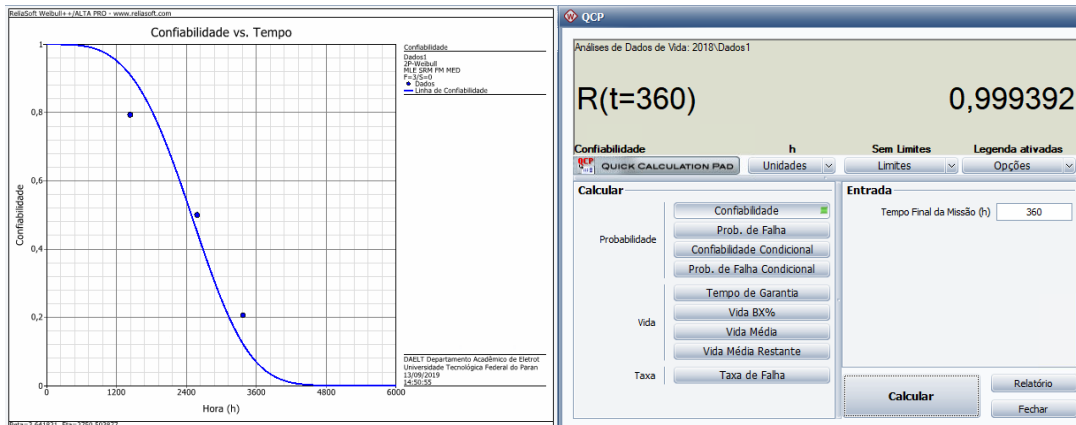
Figura 4.19: Curva da Probabilidade acumulada de Falha x Tempo (cdf) para o ano de 2018 e valor da probabilidade de falha para uma missão de 360 horas.



Fonte: a autora (2019).

Comparativamente, na Figura 4.20, tem-se a confiabilidade para a missão de 360 horas.

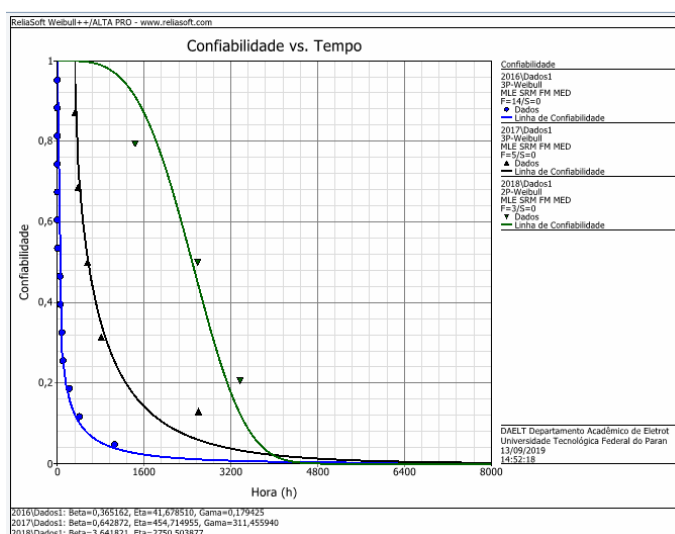
Figura 4.20: Confiabilidade x Tempo para o ano de 2018 e valor da confiabilidade para uma missão de 360 horas.



Fonte: a autora (2019).

As intervenções realizadas pela manutenção aumentaram a confiabilidade do sistema, sanando as falhas de mortalidade infantil que ainda se apresentavam. Porém, de acordo com o valor de  $\beta$  calculado na última análise, as falhas passaram a ter característica de desgaste, deixando o regulador fora da sua vida útil. Como a empresa prestadora de serviço iniciou o trabalho após o início de operação da usina, deduz-se que as falhas de projeto (prematuras) não haviam sido tratadas corretamente e por isso ainda reincidiam. Com a metodologia adotada para tratar a causa raiz e essas falhas sanadas, as anomalias passaram a ter característica de desgaste, indo diretamente para a última fase da curva da banheira, o que se apresenta coerente de acordo com os manuais dos fabricantes. A figura 4.21 mostra a variação da confiabilidade para os três anos analisados.

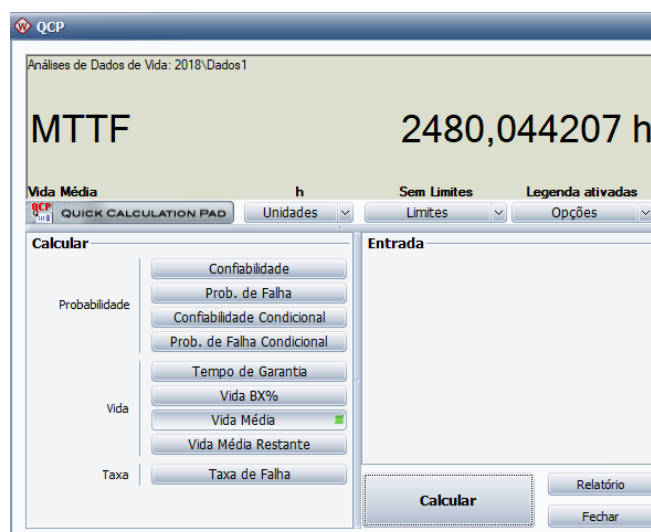
Figura 4.21: Curvas de Confiabilidade dos anos de 2016, 2017 e 2018.



Fonte: a autora (2019).

Outro indicador importante para o aumento da disponibilidade é o tempo entre falhas que também aumentou significativamente, indo para 2480 horas, vide Figura 4.22.

Figura 4.22: Valor calculado de MTTF (equivalente ao MTBF adotado no estudo) referente a 2018.



Fonte: a autora (2019).

Como a quantidade de falhas diminuiu e o tempo entre falhas aumentou, o sistema esteve mais disponível no ano de 2018, em relação aos anos anteriores, reduzindo a indisponibilidade causada por eventos forçados.

#### 4.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O Capítulo apresentou todos os resultados de confiabilidade, probabilidade de falha, taxa de falha e MTBF obtidos no *software* a partir dos dados levantados nos anos de 2016, 2017 e 2018. O resumo dos resultados nas análises dos três anos está na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados obtidos no *software* para 2016, 2017 e 2018.

	2016	2017	2018
$\beta$	0,36	0,64	3,64
$\eta$	41,67	454,71	2750,50
$\gamma$	0,17	311,45	-
<b>Probabilidade de Falha</b>	88,88%	21,12%	0,06%
<b>Confiabilidade</b>	11,12%	78,88%	99,93%
<b>MTBF</b>	182 horas	940 horas	2480 horas

Fonte: a autora (2019).

Além de apresentar os resultados, também foi feita uma comparação entre eles mostrando a o comportamento da confiabilidade do sistema no decorrer do tempo. Nessa análise, constatou-se que, a metodologia adotada pela manutenção teve resultado positivo, aumentando a confiabilidade do sistema e sua disponibilidade como consequência.

A apresentação dos resultados é o ponto principal do trabalho, pois utiliza de toda a teoria apresentada e a concretiza na utilização do *software* Weibull++, com os dados coletados e tratados.

O próximo capítulo trará as conclusões do trabalho como um todo, utilizando os resultados apresentados. O Capítulo 5 mostrará o quão vantajoso é a utilização da Engenharia de Confiabilidade para a melhoria de sistemas e aumento da disponibilidade.



## 5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo analisar o comportamento da confiabilidade de um regulador de velocidade de determinada unidade geradora de uma usina hidroelétrica, considerando ações de intervenção da equipe de manutenção.

Para isso, foram levantados os tempos entre falhas do histórico disponível e, depois de tratados, esses dados foram inseridos no *software* Weibull++ da Reliasoft para o cálculo das métricas de vida do regulador. A análise foi feita em base anual por ser um critério da empresa de manutenção para apresentação de desempenho.

O alto índice de indisponibilidade que havia se apresentado pelo gerador exigiu que a empresa prestadora de serviço um tratamento apropriado para melhorar o desempenho da geração e melhorar a confiabilidade do sistema.

Ao comparar os resultados da análise constatou-se que a aplicação da Engenharia de Confiabilidade se mostrou satisfatória para esse estudo, mostrando o aumento da confiabilidade e da disponibilidade do sistema a partir de ações corretivas realizadas pela manutenção com o auxílio de um método de análise de falhas.

Pelo método de análise de falha adotado, as causas das falhas de 2016 que estavam indefinidas foram classificadas como projeto inadequado e desajuste (montagem incorreta). Causas essas que condizem com a característica de falhas mostrada pelo valor de  $\beta$  e da curva de taxa de falha.

A partir dessa investigação, foi possível mapear as causas e tratá-las adequadamente, propondo e realizando melhoria no projeto, realizando ajustes necessários e monitorando pontos que apresentavam maior gravidade.

Os resultados obtidos após essa intervenção mostraram que as ações tomadas foram assertivas e que a Confiabilidade do sistema teve um aumento significativo.

O recurso QCP do *software* Weibull++, mostrou-se uma ótima ferramenta para o cálculo das métricas de confiabilidade, apresentado todos os resultados de forma gráfica e numérica.

A metodologia aplicada mostrou-se vantajosa para a empresa pois, tendo o histórico de falhas e o conhecimento das causas fundamentais, a equipe de manutenção deixa de trabalhar no modo reativo de solucionar problemas, diminuindo os custos causados por manutenções corretivas e pode concentrar-se em manutenções preventivas e tomadas de decisão embasadas na Confiabilidade.

### 5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme apresentado no Capítulo 2, a usina hidroelétrica sobre a qual se realizou o estudo possui três unidades geradoras porém, esse trabalho se dedicou apenas à unidade que tinha o desempenho mais crítico. Dessa forma, essa análise pode ser reaplicada para os reguladores das outras UGs.

Além disso, como foi reconhecido um aumento da Confiabilidade, um possível desdobramento é ampliar esse estudo no âmbito da teoria que compõe o crescimento da confiabilidade, utilizando outras formas para mensurar esse crescimento com outras distribuições.



## REFERÊNCIAS

- AMARAL, Giovanni Fernandes. **Estudo e melhoria da confiabilidade do sistema de controle eletrônico de voo de um Veículo Aéreo Não Tripulado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Sao Jose dos Campos.
- ANDRADE, W. S. **Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição e Sub-Transmissão Considerando Geração Distribuída**. 2007. 215f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- CARTER, A. D. S.; **Mechanical reliability**, 2nd ed. 492 p. London, England. Ed. Macmillan, 1986.
- DEVORE, J. L. **Probability & Statistics for Engineering and the Sciences**. 8ª edição. Cengage Learning, Boston, 2011.
- ENTENDA O MERCADO E A CCEE. CCEE. Disponível em <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/como-participar/participe/entenda\\_mercado?\\_afLoop=445158041932168&\\_adf.ctrl-state=4v4yqw9kd\\_1#!%40%40%3F\\_afLoop%3D445158041932168%26\\_adf.ctrl-state%3D4v4yqw9kd\\_5](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/participe/entenda_mercado?_afLoop=445158041932168&_adf.ctrl-state=4v4yqw9kd_1#!%40%40%3F_afLoop%3D445158041932168%26_adf.ctrl-state%3D4v4yqw9kd_5)>. Acesso em 14 fev. 2019.
- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de Análise de Dados**. Rio de Janeiro, Editora Elsevier, 2017.
- FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro. Editora Elsevier, 2009.
- FREITAS, M. A; COLOSSIMO, E. A. **Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados**. Belo Horizonte: Ed. Fundação Christiano Ottoni, 309p, 1997.
- GARFIELD, J. **The challenge of developing statistical reasoning**. Journal of Statistics Education, v. 10, n. 3, 2002. Acesso em 24/09/2019.
- LAFRAIA J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2001.
- LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering**. 2ª ed. Illinois, John wiley & Sons, 1996.
- MAGALHÃES, Marcos Nascimento. **Probabilidade e Variáveis Aleatórias**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2006.
- MATOS, Paulo Z; ZOTTI, Dianne M. **Análise de Confiabilidade Aplicada à Indústria para Estimções de Falhas e Provisionamento de Custos**. 2010. 59f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MENDES, A.A.; RIBEIRO, J.L.D. **Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção JIT**. Production, v. 24, n. 3, p. 675-686, 2014.

MICHAELIS. **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. Disponível em <<http://michaelis.uol.com.br/busca?id=wk4l>>. Acesso em 30 ago. 2019.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 6ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

MCQ. **Manual de treinamento interno para novos operadores de usinas hidrelétricas**. Curitiba, 2013.

ONS. Disponível em <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>> Acesso em 15 fev. 2019.

PAIVA SANTANA, Pedro. **Análise de dados de vida de um conjunto de filtros micrônicos**. 2016. 49 f. Trabalho de Monografia (Especialização em Engenharia de Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

PALLEROSI, Carlos Amadeu. **A quarta dimensão da qualidade: confiabilidade de sistemas**. São Paulo, 2007. v. 4.

PORTAL ACTION. **Estatística Básica: Noções Básicas de estatística**. Disponível em <<http://www.portalaction.com.br/estatistica-basica/17-histograma>>. Acesso em 18 de fevereiro de 2019.

REIVAX. **Programa de Aperfeiçoamento em Automação Industrial**. Módulo 1. Florianópolis, 2012.

RELIASOFT. **G400 – Fundamentos dos Modelos e Análise de Dados da Engenharia da Confiabilidade**. São Paulo, 2019.

RELIAWIKI. **Life Data Analysis Reference Book**, 2019. Disponível em <[http://www.reliawiki.org/index.php/Basic\\_Statistical\\_Background](http://www.reliawiki.org/index.php/Basic_Statistical_Background)>. Acesso em 30 ago. 2019(a).

RELIAWIKI. **Life Data Analysis Reference Book**, 2019. Disponível em <[http://reliawiki.org/index.php/The\\_Exponential\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Exponential_Distribution)>. Acesso em 30 ago. 2019(b).

RELIAWIKI. **Life Data Analysis Reference Book**, 2019. Disponível em <[http://reliawiki.org/index.php/The\\_Normal\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Normal_Distribution)>. Acesso em 30 ago. 2019(c).

RELIAWIKI. **Life Data Analysis Reference Book**, 2019. Disponível em <[http://reliawiki.org/index.php/The\\_Weibull\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution)>. Acesso em 30 ago. 2019(d).

RIGONI, E.; MARIANO, C. H. **Análise de Dados de Vida: Parte 2.** Notas de Aula. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba, Paraná, 2018(a).

RIGONI, E.; MARIANO, C. H. **Aspectos operacionais – distribuições aplicadas à confiabilidade - determinação do ajuste.** Notas de Aula. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba, Paraná, 2018(b).

SILVESTRE, Antonio Luis. **Análise de Dados e Estatística Descritiva.** 4ª ed. Portugal, Escolar Editora, 2007.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** 1ª ed. São Paulo: Editora Falconi, 2005.