

ESTUDO DE UMA TURBINA FRANCIS  
Manutenção centrada em confiabilidade e análise de abrasão

Fernanda Carvalho Marinho

Rio de Janeiro  
2015

FRANCIS TURBINE STUDY  
Reliability-centered maintenance and abrasion analysis

Fernanda Carvalho Marinho

Rio de Janeiro  
2015

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO – PUC-RIO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Fernanda Carvalho Marinho

ESTUDO DE UMA TURBINA FRANCIS  
Manutenção centrada em confiabilidade e análise de abrasão

Rio de Janeiro  
2015

Fernanda Carvalho Marinho

## ESTUDO DE UMA TURBINA FRANCIS

Manutenção centrada em confiabilidade e análise de abrasão

Projeto de graduação em Engenharia Mecânica apresentado à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO como requisição parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro

2015

## RESUMO

O projeto consiste no estudo das turbinas Francis de uma unidade geradora de uma UHE real visando aumentar a produção de energia. Serão avaliadas as periodicidades dos Planos de Manutenção Preventivas de forma a diminuir a indisponibilidade e o custo das mesmas, além disso será feita uma análise de abrasão na turbina onde foram feitas modificações no projeto original incrementando superfície adicional de alta dureza (carboneto de tungstênio) e mudança na concepção do projeto.

**Palavras Chave:** Francis. Confiabilidade. Manutenção. Periodicidade. Abrasão.

## ABSTRACT

The project consists in the study of the Francis turbines on a real generating unit to increase energy production. Periodicities will be evaluated for preventive maintenance plans in order to reduce downtime and costs, furthermore there will be an abrasion analysis of the turbines where modifications have been made in the original design and an additional coating (tungsten carbide) was applied to increase the hardness of the material.

**Keywords:** Francis. Reliability. Maintenance. Periodicity. Abrasion.

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai (in memoriam), meu maior torcedor, por nunca ter me mostrado nada além de amor e apoio incondicionais, por ter acreditado e incentivado todos os meus planos mirabolantes, por ter sido simplesmente a pessoa mais importante da minha vida, meu melhor amigo e herói.

A minha mãe, que muitas vezes na tentativa de acertar cometeu erros mas inúmeras vezes foi vitoriosa. A mulher que renunciou aos seus sonhos para que eu estivesse aqui hoje realizando o meu.

A Nala, por ser minha grande “cãopanheira”.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar à Deus por todas as bênçãos concedidas e por ter me ajudado a manter a fé mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, professor Reinaldo, por ter aceitado me guiar durante este trabalho e ter compartilhado seu tempo comigo.

Aos meus colegas de trabalho, Athos, Kátia, Fernando, Matheus e Tyago e aos meus chefes Augusto e Daniel por terem compartilhado sua experiência comigo e estarem sempre dispostos a me ajudar.

Aos meus amigos de infância, sem os quais a vida não teria a mesma graça.

À minha família, em especial a minha avó, a quem eu devo grande parte da minha criação, ao meu avô pelos inúmeros recortes de jornal me motivando a seguir em frente com a minha carreira e ao meu padrinho por estar sempre me aconselhando.

À Gisel, que nunca me deixou desistir e cujo apoio foi fundamental nessa jornada.

Aos meus sogros, por todo o carinho e por fazer com que eu me sinta sempre parte da família.

Ao meu namorado por estar do meu lado durante todos esses anos de faculdade, por todas as vezes que foi até a faculdade comigo, mesmo estudando em outro bairro, me dando força e me motivando.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema de uma PCH.....	2
Figura 2.2.1 - Custo unitário x Intervalo da Manutenção Preventiva.....	5
Figura 3.1.1 - Esquema de dado completo .....	6
Figura 3.1.2 - Esquema de dado censurado à direita .....	6
Figura 3.1.3 - Esquema de dado censurado no intervalo.....	7
Figura 3.2.1 - Esquema da taxa de falha ao longo do tempo .....	8
Figura 3.2.2 - Esquema de taxa de falha ao longo do tempo para componentes eletrônicos.....	9
Figura 3.2.3 - Esquema de taxa de falha ao longo do tempo para componentes mecânicos .....	9
Figura 3.4.1 - Função densidade de falha hipotética .....	13
Figura 4.1.1 - Tempos de vida de um componente .....	15
Figura 5.3.1 - Curva de banheira e suas respectivas distribuições.....	21
Figura 6.1 - Exemplo de uma ordem de serviço .....	24
Figura 7.1 - Esquema de curva P-F.....	27
Figura 7.2 - Exemplo de curva P-F com distribuição normal .....	28
Figura 7.3 - Exemplo de curva P-F com distribuição linear .....	28
Figura 8.1.1 - Gráfico da Probabilidade Acumulada das Gaxetas .....	31
Figura 8.1.2 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade das Gaxetas.....	31
Figura 8.1.3 - Gráfico da Taxa de Falha das Gaxetas .....	32

Figura 8.1.4 - Gráfico da Probabilidade Acumulada do Tempo de Reparo das Gaxetas .....	32
Figura 8.1.5 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade do Tempo de Reparo da Gaxeta .....	33
Figura 8.2.1 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Distribuidor .....	34
Figura 8.2.2 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade do Distribuidor .....	34
Figura 8.2.3 - Gráfico da Taxa de Falha do Distribuidor .....	35
Figura 8.2.4 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo de Reparo do Distribuidor .....	35
Figura 8.2.5 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade do Tempo de Reparo do Distribuidor .....	36
Figura 8.3.1 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo da Inspeção Trissemanal na Casa de Força .....	37
Figura 8.3.2 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade da Inspeção Trissemanal na Casa de Força .....	38
Figura 8.3.3 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo da Inspeção do Tubo de Sucção .....	38
Figura 8.3.4 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade da Inspeção no Tubo de Sucção .....	39
Figura 8.3.5 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo de Manutenção no Conduto Forçado .....	39
Figura 8.3.6 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade da Inspeção no Conduto Forçado .....	40
Figura 9.1 - Fluxograma da Casa de Força .....	41
Figura 9.2 - Fluxograma Expandido da Turbina .....	41

Figura 11.1 - Esquematização da aplicação por HVOF .....	48
Figura 11.2 - Aplicação de revestimento através do HVOF .....	49
Figura 12.1.1 - Projeto original da tampa da turbina .....	50
Figura 12.1.2 - Novo projeto da tampa da turbina .....	51
Figura 12.1.3 - Fabricação da nova tampa da turbina .....	52
Figura 12.1.4 - Montagem das tampas da turbina .....	53
Figura 12.2.1 - Projeto Original do Anel do Distribuidor .....	53
Figura 12.2.2 - Novo Projeto do Anel do Distribuidor .....	54
Figura 12.2.3 - Usinagem do Anel Inferior .....	54
Figura 12.3.1 - Projeto Original da Palheta do Distribuidor .....	55
Figura 12.3.2 - Montagem das Palhetas Novas.....	56
Figura 12.4.1 - Croqui Isométrico do Rotor .....	56
Figura 12.4.2 - Aplicação do Revestimento nas Pás do Rotor .....	57

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	Manutenção .....	3
2.1.	Tipos de manutenção .....	3
2.2.	Periodicidade dos Planos de Manutenção .....	4
3	Conceitos Básicos .....	6
3.1.	Análise de dados .....	6
3.2.	Taxas de Falha .....	7
3.3.	Parâmetros de tempo.....	10
3.4.	Função Confiabilidade .....	11
3.5.	Função Manutenibilidade .....	13
4	Disponibilidade.....	15
4.1.	Disponibilidade Operacional.....	15

4.2.	Disponibilidade Instantânea.....	17
5	Modelos paramétricos.....	18
5.1.	Distribuição Normal .....	18
5.2.	Distribuição Exponencial .....	19
5.3.	Distribuição Weibull.....	20
5.4.	Distribuição Lognormal .....	21
5.5.	Distribuição Bi-Weibull e Tri-Weibull.....	22
6	Banco de dados.....	24
6.1.	Planos de Manutenção .....	26
7	Curva P-F.....	27
8	Distribuições .....	30
8.1.	Gaxetas .....	30
8.2.	Distribuidor .....	33
8.3.	Manutenções Programadas .....	37
9	Fluxograma .....	41
10	Simulações.....	43

10.1.	Inspeção Anual no Tubo de Sucção .....	43
10.2.	Manutenção Preventiva Anual no Conduto Forçado .....	45
10.3.	Inspeção Bienal na Turbina .....	46
11	Revestimento anti-abrasão .....	48
12	Projeto de modernização das turbinas.....	50
12.1.	Tampa da turbina.....	50
12.2.	Anel Inferior do Distribuidor .....	53
12.3.	Palhetas diretrizes.....	55
12.4.	Rotor.....	56
13	Conclusões.....	58
14	Bibliografia .....	59

## 1 Introdução

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento da humanidade, ela está presente em praticamente todas as atividades do cotidiano de um cidadão comum além de ser imprescindível para o desenvolvimento econômico. Com o avanço da tecnologia, crescimento da população mundial e globalização da economia, a demanda por energia vem crescendo em ritmo acelerado enquanto os recursos naturais estão cada vez mais escassos, o que mostra a importância de fontes de energia renováveis.

No Brasil a maior parte da energia elétrica é proveniente de hidrelétricas e, com a crise hídrica que vem tomando conta não só do país mas também do mundo, há uma pressão para a otimização dos sistemas e do processo tornando-os mais confiáveis e reduzindo custos.

O tema deste trabalho surgiu através da necessidade de desenvolver um método para reduzir a indisponibilidade geral de uma UHE real, que aqui será chamada pelo nome fictício de UHE Tâmis. O aumento da confiabilidade do sistema será obtido através de um estudo da periodicidade dos planos de manutenção e da otimização das turbinas presentes nesta usina.

A UHE Tâmis é composta de 4 unidades geradoras, onde cada uma possui uma turbina do tipo Francis Simples, e está localizada em um rio com alta incidência de descargas sólidas, tornando a abrasão de diversos componentes das turbinas um problema recorrente. A recuperação das mesmas é um processo de alto custo, tanto pela duração quanto pelo serviço, e a operação das turbinas danificadas resultam na perda de rendimento por diversos motivos, entre eles o comprometimento da aerodinâmica, o que torna extremamente necessária a modernização do projeto original das turbinas.

Outra parte do trabalho propõe aplicar a manutenção centrada em confiabilidade em três elementos de uma unidade geradora: conduto forçado, turbina e tubo de sucção. Com a grande

ênfase que as paralisações estão tendo na indústria moderna e com a tendência de se trabalhar cada vez mais com estoques reduzidos, como, por exemplo, modo de produção *just-in-time*, o estudo de confiabilidade na operação da usina tornou-se uma questão estratégica. Além das manutenções preventivas estarem sujeitas a erros humanos, muitas vezes a indisponibilidade operativa pode gerar mais custos que o reparo de uma eventual falha, um exemplo disso foi a falha de um relé de proteção em um sistema energético no nordeste dos Estados Unidos que provocou a interrupção do fornecimento de energia em uma série de estados com um prejuízo de 500 milhões de dólares.<sup>1</sup>

*Figura 1.1 - Esquema de uma PCH*



*FONTE: Página do Cimento Itambé<sup>2</sup>*

---

<sup>1</sup> BIATO, Abílio Augusto Real. Fundamentos de Confiabilidade. Ano desconhecido.

<sup>2</sup> Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/pequena-central-hidreletrica-pch/>



## **2 Manutenção**

De acordo com a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 5462, a manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

A função da manutenção está presente em diversos segmentos do negócio como, por exemplo, em segurança e eficiência energética. Seu objetivo é prolongar o funcionamento de um equipamento pelo maior tempo possível mantendo suas funções principais. Ela é essencial para obter retorno do estoque de ativos da empresa.

Desta forma ela representa um papel fundamental no processo produtivo de uma empresa podendo leva-la a tornar-se mais competitiva.

### **2.1. Tipos de manutenção**

No geral pode-se classificar as manutenções em dois grandes grupos: Preventiva e Corretiva

A manutenção preventiva consiste na prevenção de defeitos antes que o funcionamento do equipamento seja afetado, ela se dá através da detecção sistemática de falhas, inspeções e pequenas correções. Elas costumam ocorrer em intervalos pré-definidos tornando-se o que chamamos de Plano de Manutenção com o objetivo de evitar que as taxas de falha dos componentes ultrapassem os níveis já previstos. Já a manutenção corretiva ocorre de acordo com a necessidade, quando há uma quebra.

Ambos os tipos de manutenção causam indisponibilidade no equipamento porém nem sempre isso afeta o sistema. No caso de uma usina hidrelétrica, por exemplo, pode-se fazer uma

manutenção no banco de baterias sem afetar a geração de energia, diferente de uma inspeção na turbina. Mas elas sempre geram custos de mão de obra e, às vezes, de material.

## **2.2. Periodicidade dos Planos de Manutenção**

“A engenharia da confiabilidade é a disciplina que está relacionada com o tratamento probabilístico de falhas em sistemas.”<sup>3</sup>

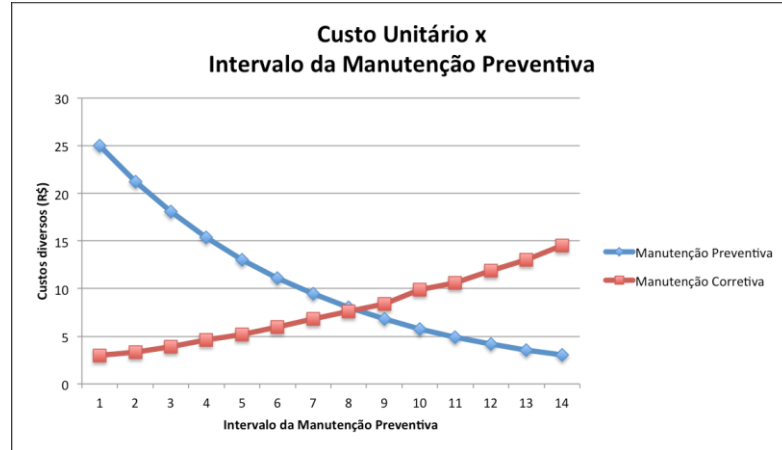
Encontrar a estratégia ótima de manutenções é um grande desafio da indústria. Para que esse objetivo seja alcançado deve-se atender a diversas metas como aumento da confiabilidade, redução de custos, atingir valores pré-definidos de disponibilidade e superar a demanda de produção. Porém não é possível atingir todos esses parâmetros ao mesmo tempo, a periodicidade dos planos de manutenção deve ser estudada de acordo com o objetivo de cada empresa. Um exemplo é sua aplicação em negócios de equipamentos de segurança, como neste caso não são admitidas falhas, a manutenção preventiva deverá predominar e a redução de custos deverá ser sacrificada em prol da redução de riscos, já no mercado elétrico o interesse é em aumentar disponibilidade e minimizar custos, logo é necessário um modelo que relacione custo com políticas de manutenção.

O gráfico abaixo ilustra a relação entre o custo e a periodicidade dos planos de manutenção.

---

3 LEES, F.P. Loss prevention in the process industries. 1991. P. 77

Figura 2.2.1 - Custo unitário x Intervalo da Manutenção Preventiva



FONTE: Elaborado pela autora.

### 3 Conceitos Básicos

#### 3.1. Análise de dados

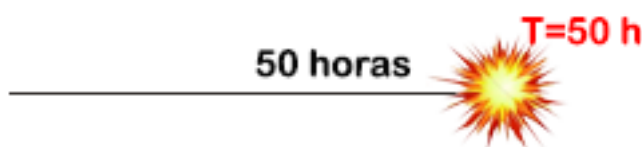
Para que o estudo da periodicidade destes planos seja realizado é essencial um banco de dados completo onde serão analisados dados de variáveis como durabilidade, tempo de reparo, tempo entre trocas, preventivas e outras. Esse processo é feito pela modelagem das variáveis aleatórias, isto é, variáveis cujo valor real só é conhecido após o fim do evento, através de distribuições de probabilidade.

Os dados utilizados neste estudo são provenientes do sistema utilizado na UHE Tâmbisa que é alimentado pelos operadores da usina na forma de Ordens de Serviço (OS) conforme as manutenções, tanto corretivas como preventivas, são realizadas.

Pode-se encontrar os dados em três diferentes formas:

Dado completo: São aqueles onde conhecemos o exato momento onde a falha ocorre, estes são os mais importantes para a modelagem do tempo de vida de um componente.

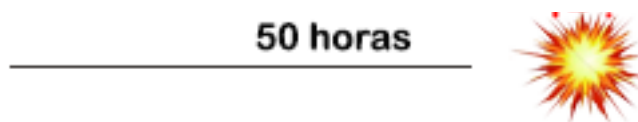
*Figura 3.1.1 - Esquema de dado completo*



*FONTE: Elaborado pela autora*

Dado censurado à direita (suspensão): Nestes tipos de dados apenas se conhece o tempo mínimo de vida do componente, são encontrados quando a falha não é identificada no exato momento em que ela ocorre, somente um tempo depois.

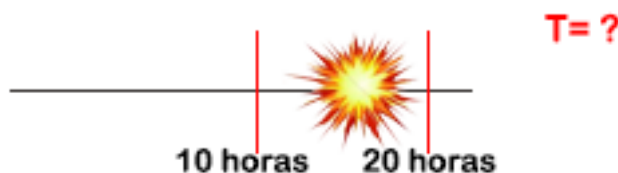
*Figura 3.1.2 - Esquema de dado censurado à direita*



*FONTE: Elaborado pela autora*

Dado censurado no intervalo (inspeção): Obtemos esse tipo de dado quando é conhecido apenas o intervalo onde a falha ocorre, sabe-se os dois extremos porém não o momento exato da falha.

*Figura 3.1.3 - Esquema de dado censurado no intervalo*



*FONTE: Elaborado pela autora*

Na análise deste trabalho foram encontrados dados múltiplos, isto é, apresentam-se as três formas no conjunto total de informações coletadas.

### **3.2. Taxas de Falha**

“Falha é a impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua função no nível especificado ou requerido.”<sup>4</sup>

As taxas de falha são importantes indicadores de confiabilidade e, muitas vezes seus significados são confundidos. O termo taxa de falha deve ser usado apenas para situações onde o componente não tem mais possibilidade de ser reparado, já em casos onde este pode ser recuperado chamamos de ROCOF (taxa de ocorrência de falhas).

Temos também, análogas as velocidades médias e instantâneas, temos as taxas de falha médias ( $\lambda$ ) e instantâneas, sendo esta última variável ao longo do tempo e da natureza do equipamento.

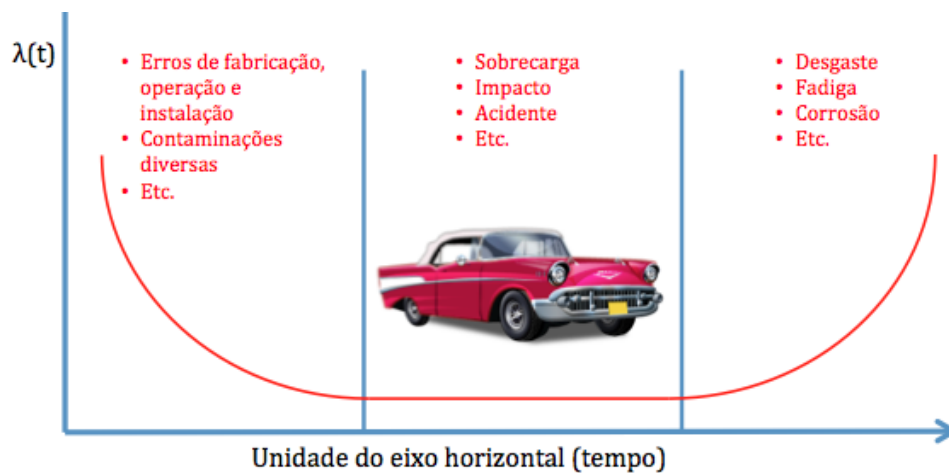
---

<sup>4</sup> RAPOSO, José Luis Oliveira. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso e análise de risco no diagram de decisão. 2004. P.9

Em resumo pode-se definir taxa de falha como a relação entre os componentes do sistema que estão em falha e os sobreviventes no tempo  $t$ .

Na figura 3.2.1 podemos exemplificar o comportamento da taxa de falha instantânea de um equipamento ao longo do tempo através do que chamamos de curva da banheira.

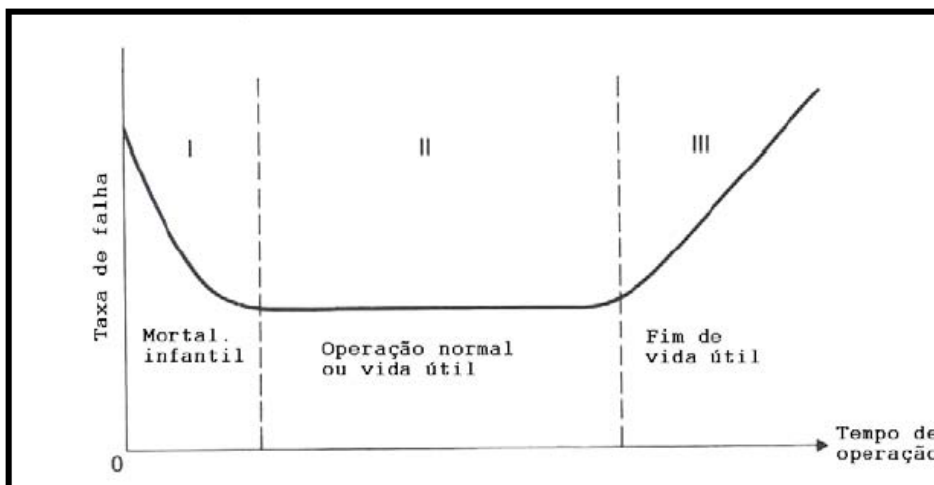
*Figura 3.2.1 - Esquema da taxa de falha ao longo do tempo*



*FONTE: LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014. P.76*

Diferentes tipos de equipamento podem apresentar diferentes variações desta curva, por exemplo, para componentes eletrônicos observamos uma vida útil maior (maturidade) enquanto para mecânicos temos uma terceira fase mais acentuada, como pode ser observado nas figuras abaixo:

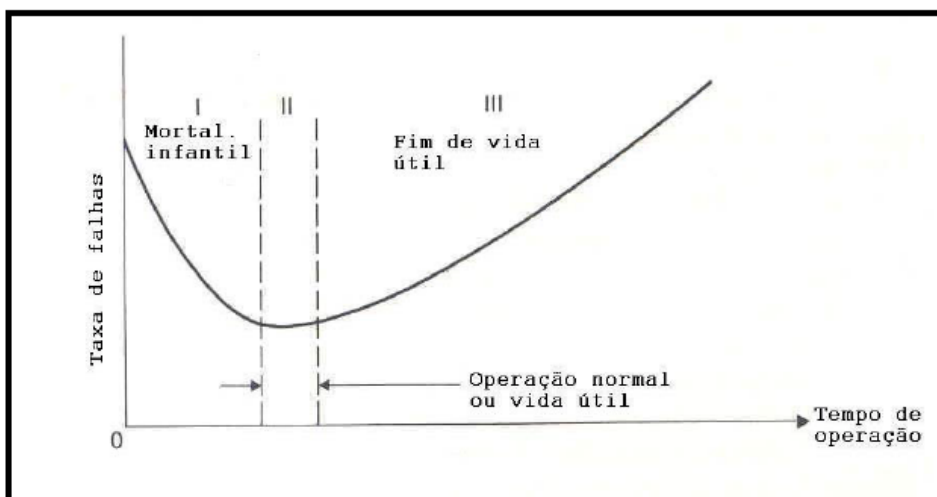
Figura 3.2.3 - Esquema de taxa de falha ao longo do tempo para componentes eletrônicos



FONTE: BILLINTON, R. ALLAN, R. Reliability evaluation of engineering systems – Concepts and techniques.

1992. P.166

Figura 3.2.2 - Esquema de taxa de falha ao longo do tempo para componentes mecânicos



FONTE: BILLINTON, R. ALLAN, R. Reliability evaluation of engineering systems – Concepts and techniques.

1992. P.166

A curva de taxa de falha no formato típico da banheira pode ser obtida através da equação:

$$\lambda(t) = b\beta(\beta t)^{b-1}e^{-(\beta t)^b} \text{ para } \beta, b > 0 \text{ e } t \geq 0.^5$$

Onde  $\beta$  é parâmetro de escala,  $b$  de forma e  $t$  tempo.

### 3.3. Parâmetros de tempo

O tempo que um sistema leva até falhar é chamado de MTTF (Mean Time To Failure), ele é calculado pela média aritmética dos tempos dos equipamentos até o momento da falha em equipamentos onde não é possível a realização de reparo.

$$MTTF = \frac{\sum TEMPO}{\sum FALHAS}^6$$

---

5 DHILLON, B.S. Reliability systems in design and operation. 1982. P.24

6 LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014.



Já o termo MTBF (Mean Time Before Failure) representa a média de tempo que o sistema funciona até sua falha, este é aplicado para equipamentos reparáveis. É importante frisar que não se inclui o tempo de reparo do equipamento, apenas o de funcionamento até a quebra.

Para calcular a média de tempo usado para o reparo do equipamento utilizamos o conceito de MTTR (Mean Time o Repair). Podemos definir matematicamente como:

$$MTTR = \frac{\sum FALHAS * TEMPO DE REPARO}{\sum FALHAS}^7$$

O tempo de manutenção é definido como o tempo total que o componente está em operação não satisfatória, ele é representado pelo somatório do MTTR com os demais tempos de espera necessários para a manutenção do equipamento como, por exemplo, tempo para deslocamento de sobressalentes e tempo para detectar a falha.

### 3.4. Função Confiabilidade

A função confiabilidade representa a probabilidade de um componente realizar determinada função durante um determinado tempo em determinadas condições operacionais.<sup>8</sup> Esta também é chamada de probabilidade acumulada decrescente.

Matematicamente pode-se dizer que, se um componente funciona durante um tempo  $t$  sem nenhuma manutenção corretiva podemos representar os equipamentos sobreviventes e em falha por  $n_s(t)$  e  $n_f(t)$ . A função confiabilidade  $R(t)$  é:

---

<sup>7</sup> BIATO, Abílio Augusto Real. Fundamentos de Confiabilidade. Ano desconhecido.

<sup>8</sup> Ebeling, C. E. An introduction to reliability and maintainability engineering, Waveland Press. 2010, p.5

$$R(t) = \frac{1-n_f(t)}{n} \text{.}^9$$

Análogo a função confabilidade também temos a probabilidade de falha, que nada mais é que a probabilidade acumulada crescente. Ela estima o risco de falha dos componentes até um determinado tempo e pode ser representada por:

$$Q(t) = \frac{n_f(t)}{n_f(t)+n_s(t)} \text{.}^{10}$$

Logo temos:

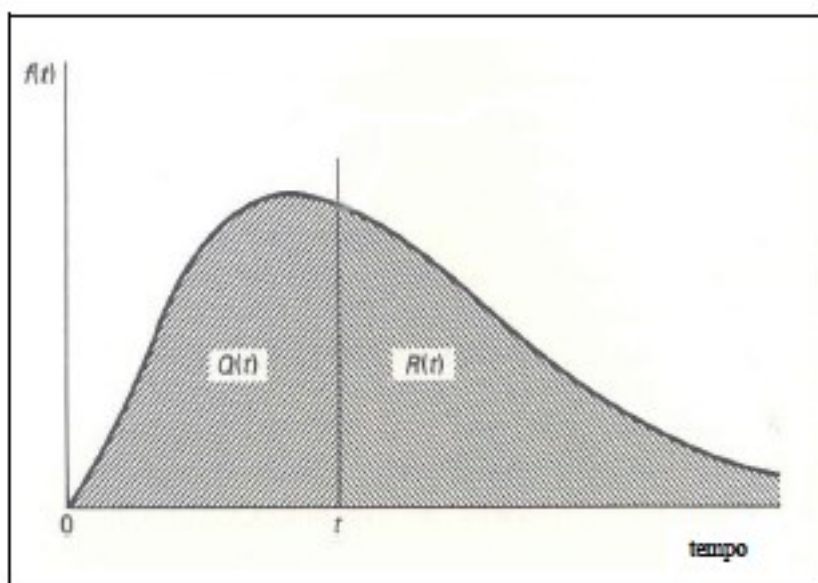
$$Q(t) + R(t) = 1$$

---

9 RAPOSO, José Luis Oliveira. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso e análise de risco no diagram de decisão. 2004. P. 8

10 RAPOSO, José Luis Oliveira. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso e análise de risco no diagram de decisão. 2004. P. 8

Figura 3.4.1 - Função densidade de falha



FONTE: BILLINTON, R. ALLAN, R. *Reliability evaluation of engineering systems – Concepts and techniques*.

1992. P.61

### 3.5. Função Manutenibilidade

Mantenabilidade é definida como a probabilidade de um sistema voltar a operação, dentro das condições de uso especificadas, dentro de um período. É importante enfatizar que este conceito está ligado apenas aos sistemas e não aos componentes. Esta é analisada através da função de probabilidade acumulada crescente, que é definida como:

$$F(T^*) = \int_0^{T^*} f(T) dt \quad 11.$$

---

11 LIMA, Gabriel Costa. *Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos*. 2014. Pág.85.

Logo, a função manutenibilidade está relacionada com o desempenho das equipes de manutenção em diminuir o tempo de indisponibilidade dos equipamentos, sendo importante para o controle de custo da manutenção.

## 4 Disponibilidade

A norma NBR-5462 da ABNT define disponibilidade como “capacidade de um item estar em condições de executar 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”.

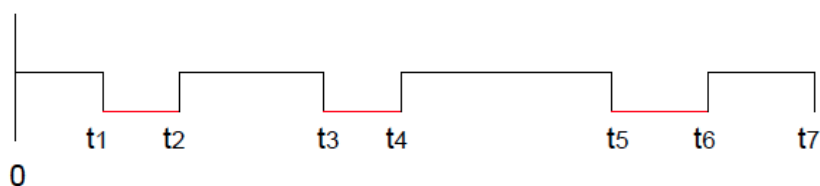
O termo disponibilidade, neste caso, é usado como uma forma de medir o desempenho da disponibilidade. Este conceito é fundamental para o estudo de manutenção centrada em confiabilidade porque sozinho agrega os conceitos de confiabilidade, manutenibilidade e operabilidade.

A disponibilidade do sistema, no fim, é a porcentagem esperada de tempo no qual um equipamento estará apto para operar quando requisitado. Conceitualmente podemos dividi-la em duas formas: disponibilidade operacional e instantânea.

### 4.1. Disponibilidade Operacional

A maior parte dos sistemas da engenharia possuem comportamento similar, eles falham, logo após são reparados e depois de um tempo falham novamente, criando um ciclo. Desta forma temos diferentes tempos de vida para um mesmo componente em situações operacionais semelhantes, o que é ilustrado pela figura 4.1.1:

*Figura 4.1.1 - Tempos de vida de um componente*



*FONTE: LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014. P.101*

A disponibilidade operacional é a medida de um sistema reparável quando este encontra seu estado estável, então podemos afirmar que este é o conceito que realmente afeta a capacidade de produção de um sistema já que toda parada é considerada, logo esta é a definição mais empregada na prática podendo ser definida matematicamente por:

$$DO = \frac{\text{Tempo total indisponível}}{\text{Tempo total do calendário}}^{12}$$

Ou, utilizando os conceitos anteriormente discutidos:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}^{13}$$

Podemos concluir que, como a disponibilidade depende da confiabilidade e da manutenção, se esta for realizada corretamente, a disponibilidade deve ser maior que a confiabilidade num instante  $t$ .

---

12 LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014. P.102

13 BIATO, Abílio Augusto Real. Fundamentos de Confiabilidade. Ano desconhecido.

## 4.2. Disponibilidade Instantânea

Esta é definida como a probabilidade do sistema estar funcionando num determinado instante  $t$ , sendo uma medida pontual. Esta definição engloba duas situações diferentes: O sistema pode estar funcionando ininterruptamente até  $t$  ou o sistema funciona desde o último reparo até  $t$ .

## 5 Modelos paramétricos

Existem diversos tipos de distribuições que podem ser usadas para modelar o comportamento de certo conjunto de dados, inclusive pode-se aplicar diferentes tipos para diferentes subconjuntos de forma a ajustar as variáveis da forma mais exata possível. A distribuição escolhida influi diretamente no resultado final do estudo, portanto é de extrema importância selecionar a distribuição correta.

As distribuições mais usadas são a Normal, Exponencial, Weibull e Lognormal, cada uma com parâmetros e densidades diferentes, desta forma definiremos genericamente a taxa de falha das distribuições paramétricas por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

### 5.1. Distribuição Normal

Na distribuição normal a função densidade de probabilidade é definida pela equação:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})} e^{-\left[\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad \sigma > 0, -\infty < t < \infty$$

Onde  $\sigma$  é o desvio padrão,  $\mu$  é a média e  $t$  o tempo.



Logo, a função probabilidade de falha da distribuição normal é:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})} e^{-\left[\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} dt$$

## 5.2. Distribuição Exponencial

A função densidade nesse caso é:

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

Sendo  $\lambda$  a taxa instantânea de falha e  $t$  é o tempo.

A função confiabilidade é:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Consequentemente a probabilidade de falha para a exponencial é:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

O tempo até a falha é distribuído exponencialmente quando a taxa de falha é constante, porém esses casos acontecem geralmente quando os modos de falha ocorrem de forma imprevisível e catastrófica. A taxa de falha será:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

### 5.3. Distribuição Weibull

A Weibull é uma das distribuições mais flexíveis por ter três parâmetros. Sua densidade de probabilidade é:

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

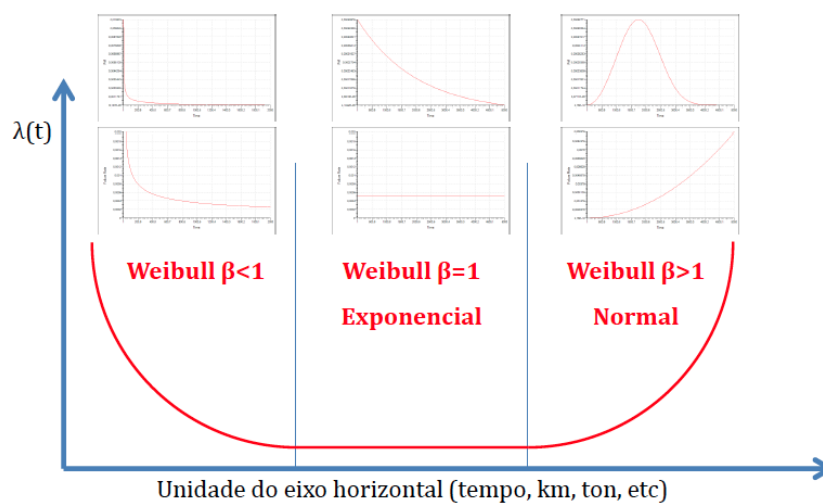
Sendo  $t$  o tempo e  $\beta, \eta$  e  $\gamma$  parâmetros de forma, escala e localização, que devem ser estimados a partir do banco de dados.

Enquanto isso a função confiabilidade é:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Através da distribuição Weibull podemos modelar a distribuição normal com  $\beta > 1$ , a exponencial com  $\beta = 1$  e todas as fases da curva de banheira como pode ser demonstrado na figura abaixo:

*Figura 5.3.1 - Curva de banheira e suas respectivas distribuições*



*FONTE: LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014. P.134*

#### 5.4. Distribuição Lognormal

Esta distribuição é mais adequada para modelar tempos de reparo de sistemas, componentes com taxa de falha decrescente (componentes com erros de instalação, fabricação e outros), componentes com taxa de falha constante e outros na fase III, da velhice.

A função densidade de probabilidade é:

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

Onde  $\mu^*$  é a média de  $\ln(t)$  e  $\sigma^*$  é o desvio padrão de  $\ln(t)$ , por não serem estimados a partir de  $t$  e sim de  $\ln(t)$  eles são grandezas adimensionais. Esses parâmetros são estimados a partir da verossimilhança e da distribuição linear.

### 5.5. Distribuição Bi-Weibull e Tri-Weibull

Este tipo de distribuição se assemelha a Weibull, porém com um maior número de parâmetros. Ela é mais empregada em casos onde mais de um modo de falha possui influência sobre o sistema.

Um exemplo de função taxa de falha para uma distribuição bi-Weibull (dois modos de falha) é:

$$\lambda(t) = \frac{\beta_1 t^{\beta_1-1}}{\eta_1^{\beta_1}} + \frac{\beta_2 t^{\beta_2-1}}{\eta_2^{\beta_2}}$$

Onde os parâmetros são os mesmos da Weibull, porém cada um para seu respectivo modo de falha.

Da mesma forma existe a distribuição tri-Weibull para três modos de falha, esta é mais recomendada para dados misturados onde não seja possível distinguir os modos de falha de cada subconjunto.

Apesar de, aparentemente essa distribuição ser mais precisa ela é recomendada apenas para casos com um grande número de dados.

## 6 Banco de dados

Os dados usados para o desenvolvimento desse projeto foram obtidos através do IFS, um software de negócios usado pela empresa responsável pela operação da UHE Tâmisia desde 2011. Para dados mais antigos foi realizada uma pesquisa nos documentos da usina, porém os resultados obtidos não possuíam riqueza em detalhes.

O IFS possui um módulo onde são inseridas as manutenções preventivas com intervalos programados e, de acordo com estes, são geradas as Ordens de Serviço (OS) programadas. Nestas os mantenedores, nome que se dá aos operadores locais da usina, descrevem o serviço realizado na manutenção, eventuais dificuldades e problemas encontrados. Além disso são apontadas as horas que cada mantenedor gastou na manutenção, caso tenha havido indisponibilidade estas horas também são especificadas e, caso haja retirada de material do estoque ou uso de mão de obra terceirizada, seus custos também se encontram disponíveis para consulta. Todos estes apontamentos também são feitos nas ordens de serviço corretivas, porém estas são abertas manualmente pelo mantenedor após a realização da manutenção.

*Figura 6.1 - Exemplo de uma ordem de serviço*

The screenshot displays the 'IFS Applications - Editor' window for a service order. The top section contains input fields for 'Nº OS' (25508), 'Site' (8022B), 'Diretriz' (OP - Desarme da unidade com atuação 'Relé bloqueio'), 'Apontado Por' (R/G), and 'Status' (Serviço Concluído). Below this is a horizontal tab bar with options like 'Apontamento', 'Orçamento', 'Notas Livres', 'Tarefas', 'Apontamento de Horas', 'Contabilizações', 'Material', 'Requisição', 'Ferramentas e Unid Produção', 'Devoluções', and 'Info Ord Venda'. The main form area includes fields for 'Objeto', 'Tipo de Conexão' (Equipamento), 'ID Objeto' (XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX), 'Site' (8022B), and 'Descrição' (XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX). A 'Descrição Motivo' field contains a detailed text description of a trip event at the substation. There are also checkboxes for 'Gerar Nota', 'Certificado de Liberação', and 'Transferido para Disp'. A date field shows '22/6/2015 16:49:00'. A small dialog box is open on the right, displaying the same description text.

*FONTE: Banco de dados da UHE no software IFS*

O grande número de preventivas, que traz como consequência um pequeno número de corretivas, foi uma dificuldade encontrada neste trabalho já que não houveram muitos dados de tempos até a falha.

### 6.1. Planos de Manutenção

Neste projeto apenas estão sendo avaliados os condutos forçados, turbinas e tubos de sucção de uma unidade geradora composta por duas turbinas Francis verticais, logo apenas foram avaliados planos de manutenção cujo escopo engloba estes equipamentos.

Alguns dos dados usados nas análises são provenientes de ordens de manutenção geradas por planos que hoje estão inativos, apesar destes terem sido usados para definir a distribuição mais adequada a cada componente do sistema, eles não terão sua periodicidade avaliada por estarem obsoletos. Apenas os planos ativos, listados abaixo, serão considerados.

*Tabela 1 - Planos de Manutenção*

Descr Serviço	Intervalo	Unid Intervalo
INSPEÇÃO ANUAL SUPERFÍCIE DE CONCRETO DO TUBO DE SUÇÃO DA UG1	1	Ano
INSPEÇÃO ANUAL SUPERFÍCIE DE CONCRETO DO TUBO DE SUÇÃO DA UG2	1	Ano
MANUTENÇÃO PREVENTIVA ANUAL NO CONDUTO FORÇADO 1	1	Ano
MANUTENÇÃO PREVENTIVA ANUAL NO CONDUTO FORÇADO 4	1	Ano
INSPEÇÃO TURBINA FRANCIS UG1	2	Ano
INSPEÇÃO TURBINA FRANCIS UG2	2	Ano
INSPEÇÃO TRISSEMANAL NOS EQS CA CASA DE FORÇA	2	Dias

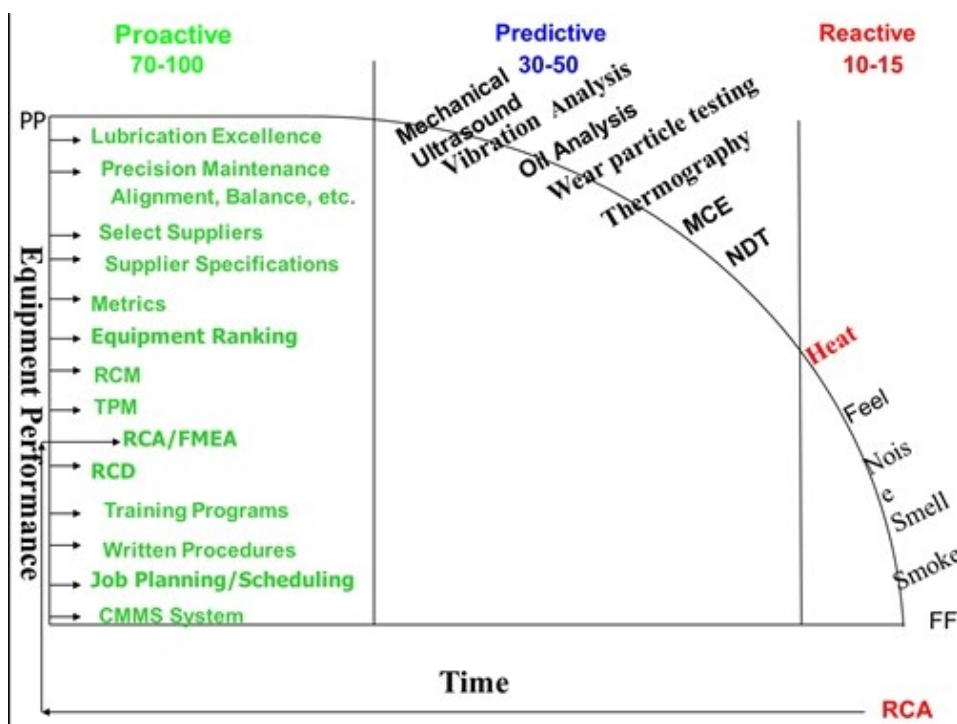
No caso da inspeção trissemanal nos equipamentos da casa de força serão considerados apenas os equipamentos que estão tanto no escopo desta manutenção quanto nessa análise, isto é, as gaxetas da turbina.



## 7 Curva P-F

Esta curva é usada para ilustrar o comportamento de um equipamento conforme o mesmo se aproxima do momento da falha, desta forma se modela as manutenções preventivas. Ela estima a eficiência e a eficácia de uma inspeção informando a capacidade de detecção da falha durante a mesma.

Figura 7.1 - Esquema de curva P-F

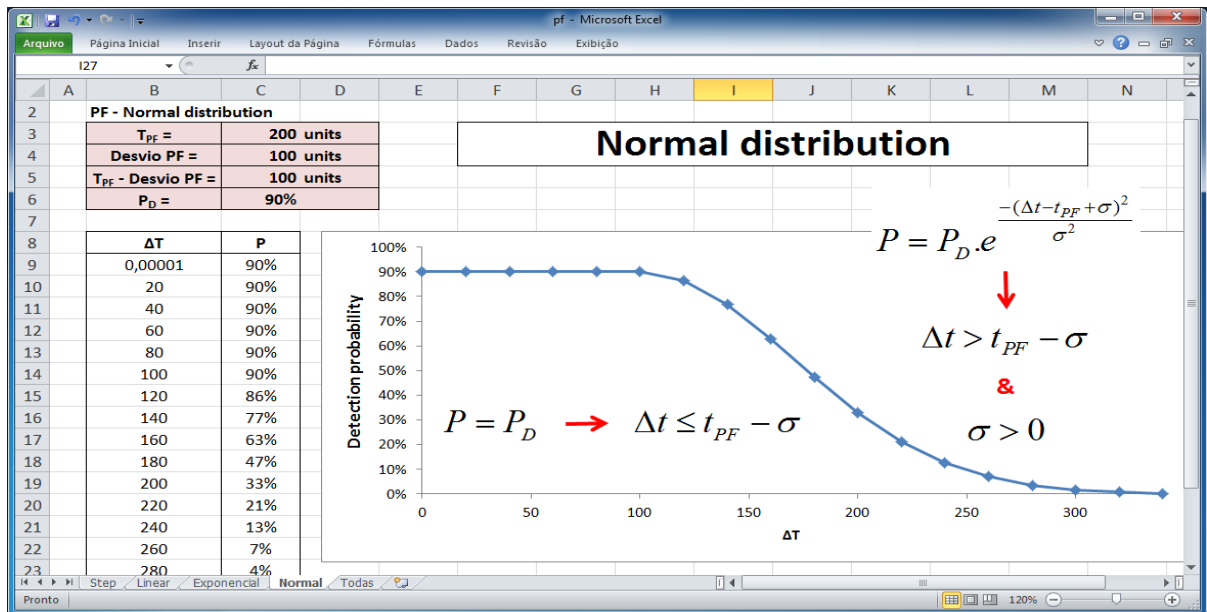


FONTE: Página UE Systems Inc.<sup>14</sup>

Neste projeto as manutenções preditivas foram modeladas de acordo com uma distribuição normal, que representa uma capacidade maior de detecção com intervalos de tempo maiores, que no caso foram os próprios intervalos dos planos de manutenção.

14 Disponível em: <http://www.uesystems.com/news/understanding-the-p-f-curve-and-its-impact-on-reliability-centered-maintenance>

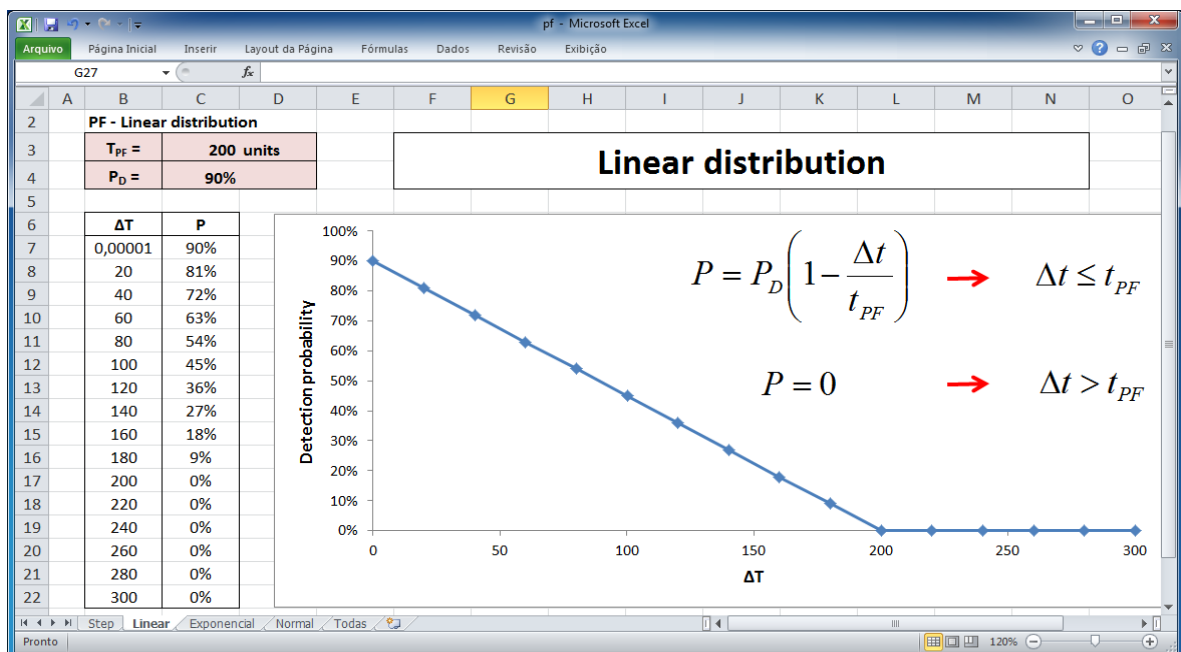
Figura 7.2 - Exemplo de curva P-F com distribuição normal



FONTE: LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014. P.200

Já para as inspeções visuais foi definida uma distribuição linear, com o intervalo de tempo estimado da mesma maneira que nas preditivas.

Figura 7.3 - Exemplo de curva P-F com distribuição linear



FONTE: LIMA, Gabriel Costa. Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos. 2014. P.201

Então, os parâmetros das curvas P-F para cada plano de manutenção são:

*Tabela 2 - Parâmetros das curvas P-F*

Descr Serviço	Intervalo (horas)	Probbailidade de detecção	Distribuição
INSPEÇÃO ANUAL SUPERFICIE DE CONCRETO DO TUBO DE SUCÇÃO DA UG1	8760	1	Linear
INSPEÇÃO ANUAL SUPERFICIE DE CONCRETO DO TUBO DE SUCÇÃO DA UG2	8760	1	Linear
MANUTENÇÃO PREVENTIVA ANUAL NO CONDUTO FORÇADO 1	8760	1	Normal
MANUTENÇÃO PREVENTIVA ANUAL NO CONDUTO FORÇADO 2	8760	1	Normal
INSPEÇÃO NA TURBINA FRANCIS UG1	17520	0,85	Linear
INSPEÇÃO NA TURBINA FRANCIS UG2	17520	0,85	Linear
INSPEÇÃO TRISSEMANAL NOS EQS CA CASA DE FORÇA	48	1	Linear

## **8 Distribuições**

Foram adicionados os tempos de falha encontrados no banco de dados ao programa Availability Workbench para que este modelasse a distribuição que melhor se aplica a cada caso.

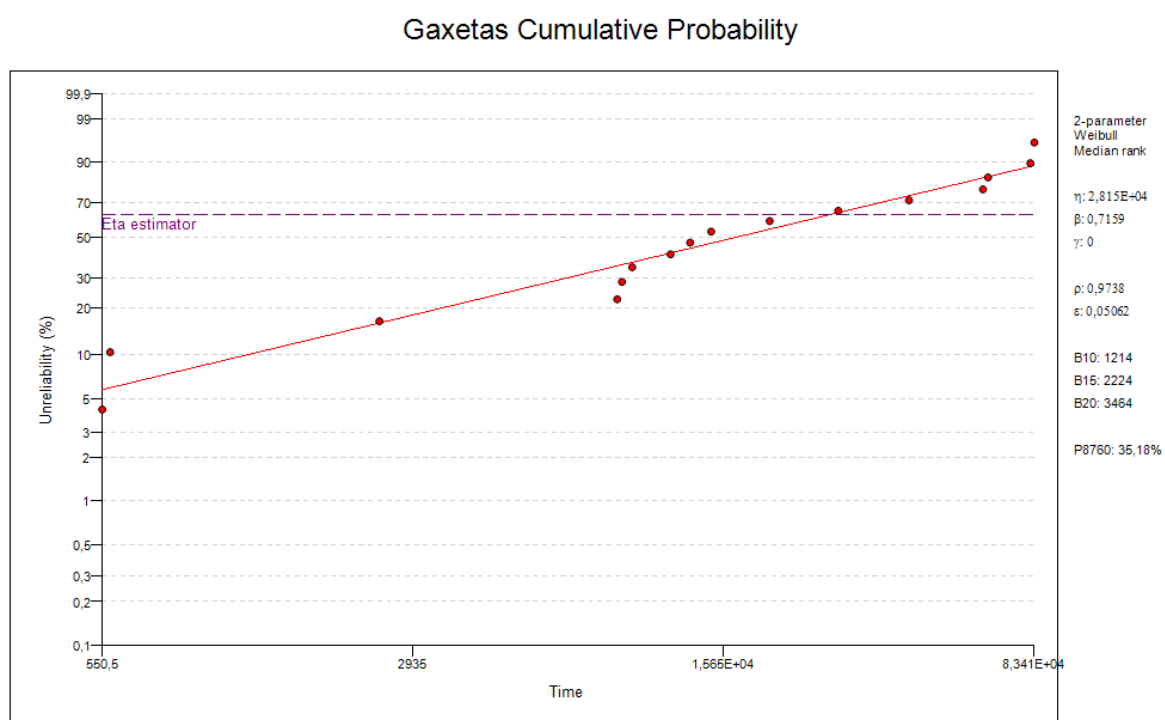
Os tempos até a falha foram calculados a partir da ultima recorrência, já para a primeira falha foi considerada a data de entrada de operação da usina.

### **8.1. Gaxetas**

A turbina é um dos componentes mais importantes de uma usina hidrelétrica, logo há bastante estudo e cuidado na hora de projetá-la e montá-la levando a um número de falhas quase nulo. Dos seus componentes o que mais necessita de manutenções corretivas é a gaxeta.

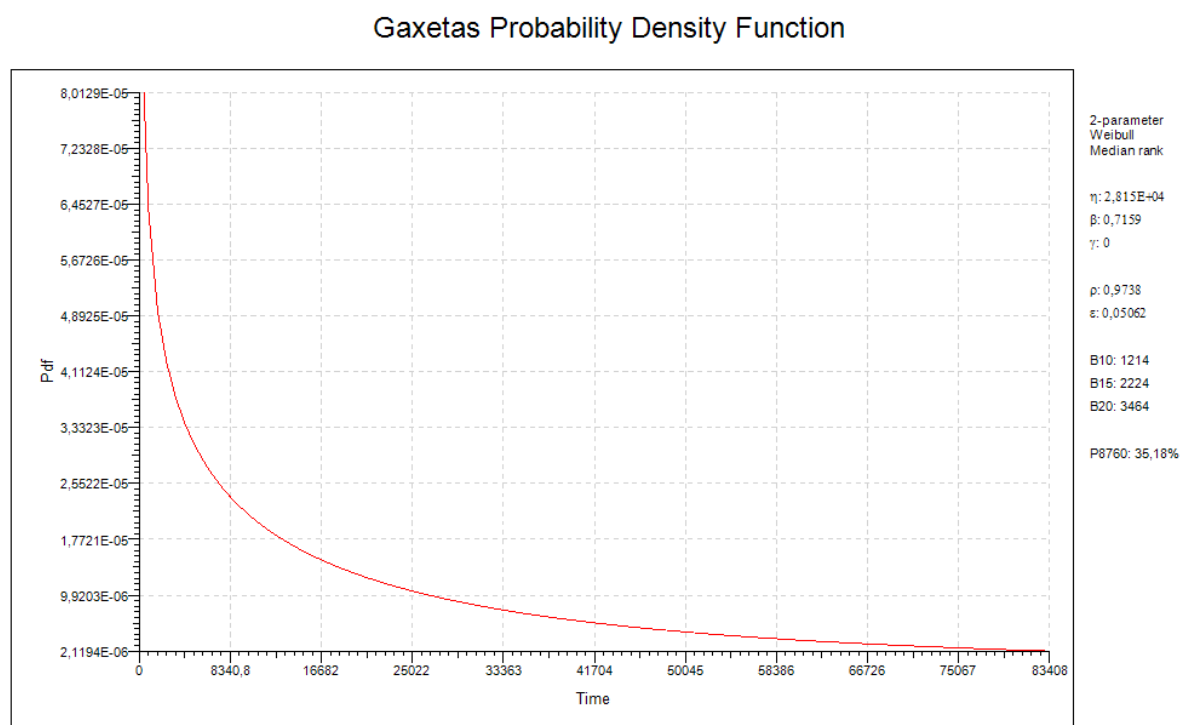
A partir dos dados encontrados o software modelou para seu modo de falha uma curva Weibull de dois parâmetros. Conforme podemos verificar a seguir 10% da amostragem falha com 1214 horas, 15% com 2224 horas e 20% com 3464, em um ano (8760 horas) 35,18% das peças falham.

Figura 8.1.2 - Gráfico da Probabilidade Acumulada das Gaxetas



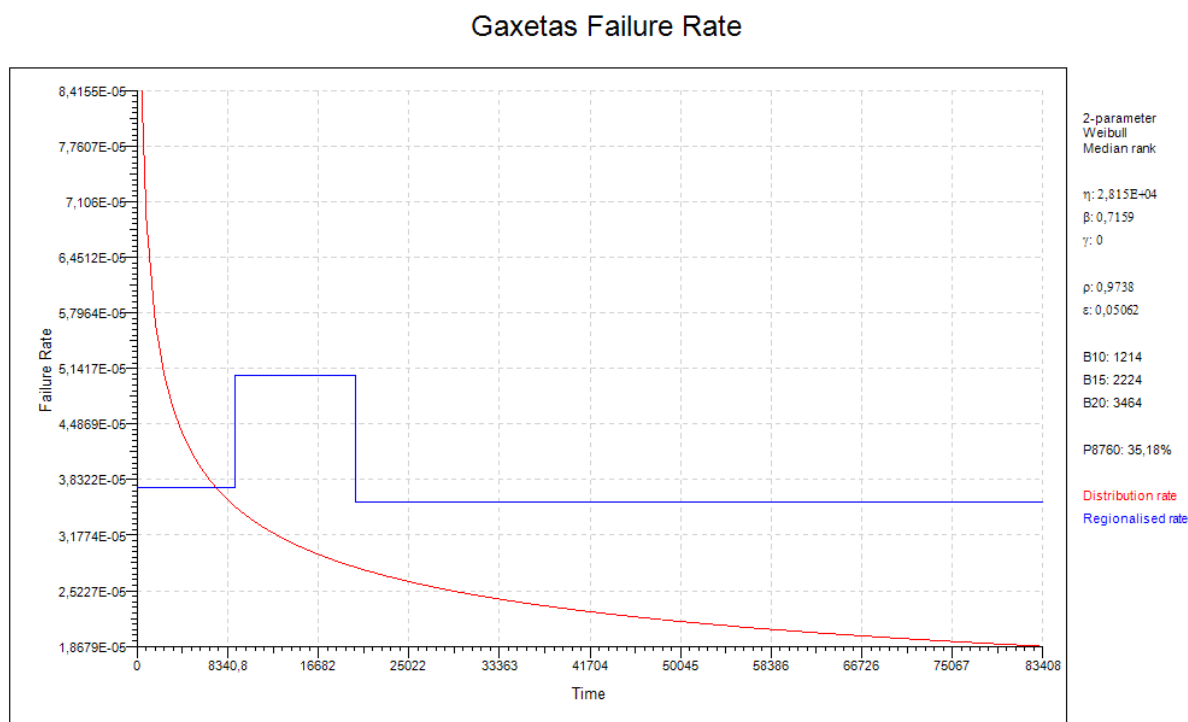
FONTE: Availability Workbench

Figura 8.1.1 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade das Gaxetas



FONTE: Availability Workbench

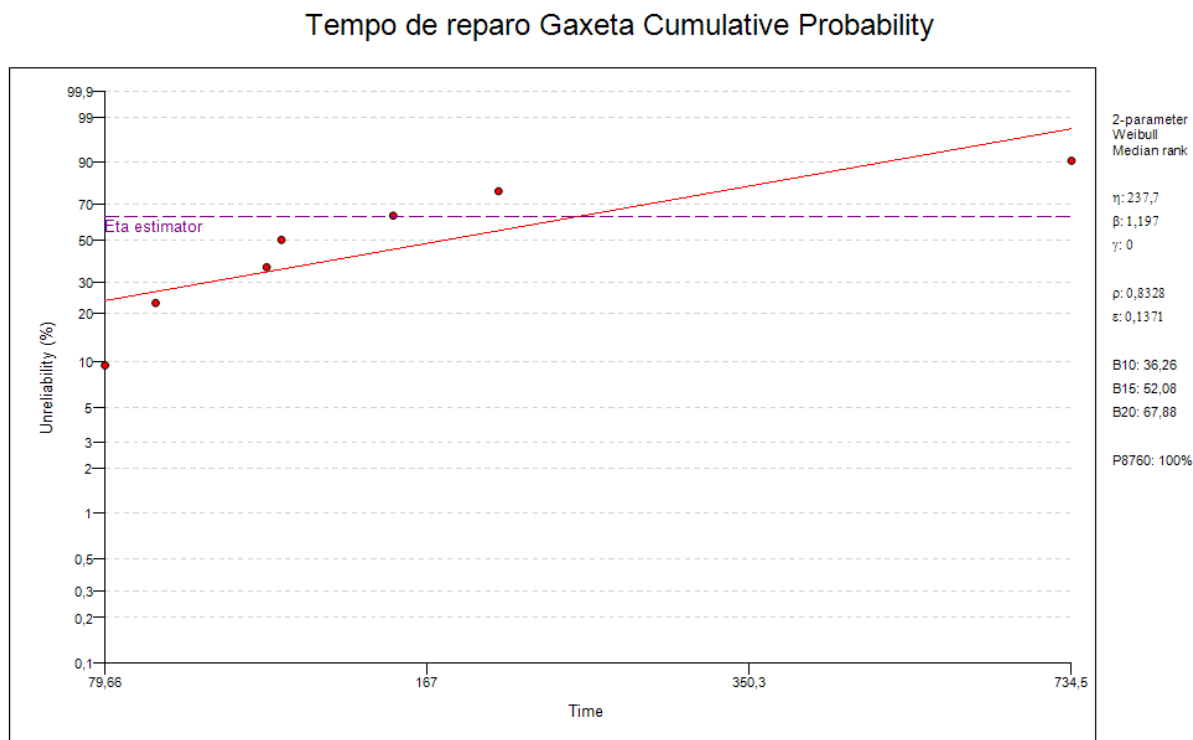
Figura 8.1.3 - Gráfico da Taxa de Falha das Gaxetas



FONTE: Availability Workbench

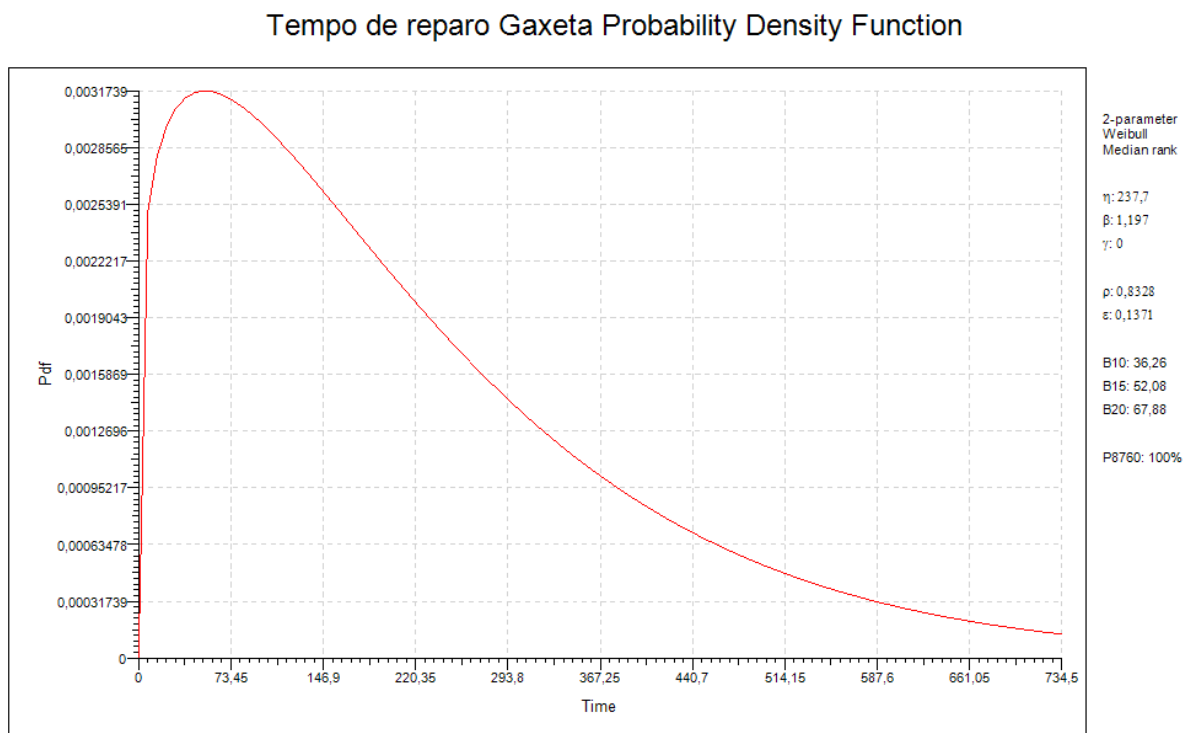
Analogamente, usando as durações das manutenções corretivas, foi modelado o tempo de reparo.

Figura 8.1.4 - Gráfico da Probabilidade Acumulada do Tempo de Reparo das Gaxetas



FONTE: Availability Workbench

Figura 8.1.5 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade do Tempo de Reparo da Gaxeta



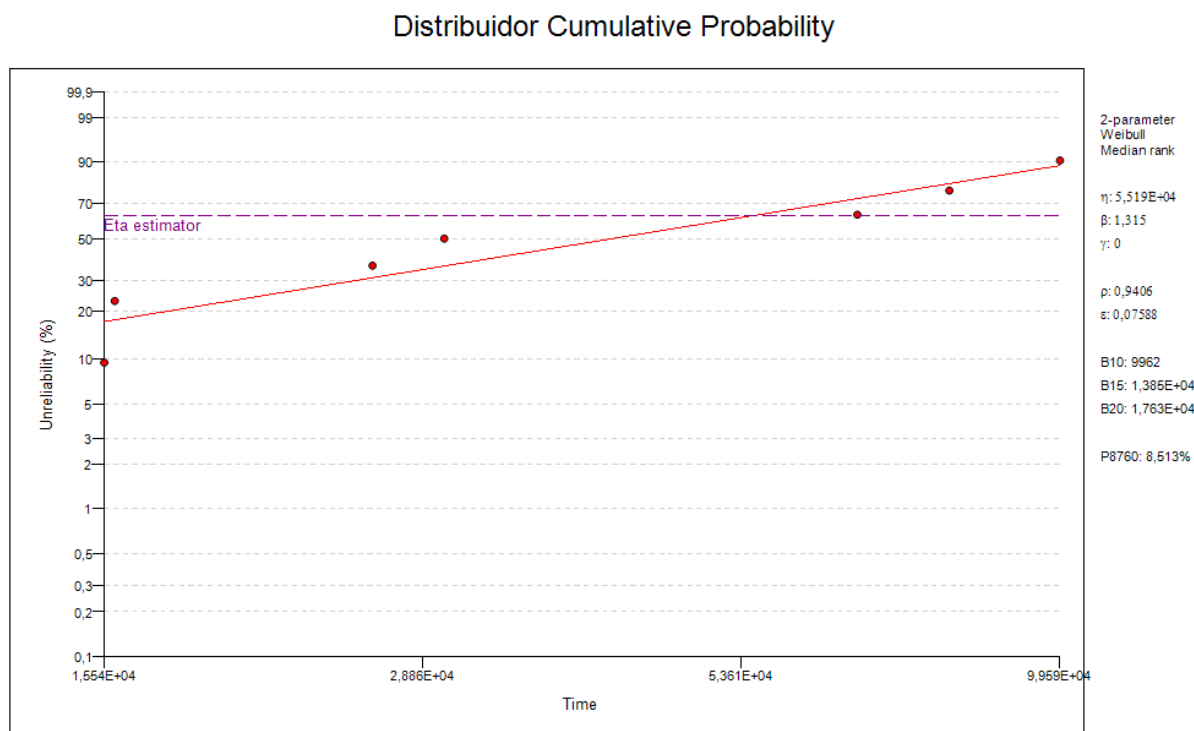
*FONTE: Availability Workbench*

## 8.2. Distribuidor

Grande parte das falhas encontradas no distribuidor da turbina são referentes à trocas das buchas das bielas porém, como foram encontradas falhas pontuais em outros componentes como, por exemplo, em uma pá, não foram considerados os componentes separadamente e sim o equipamento como um todo.

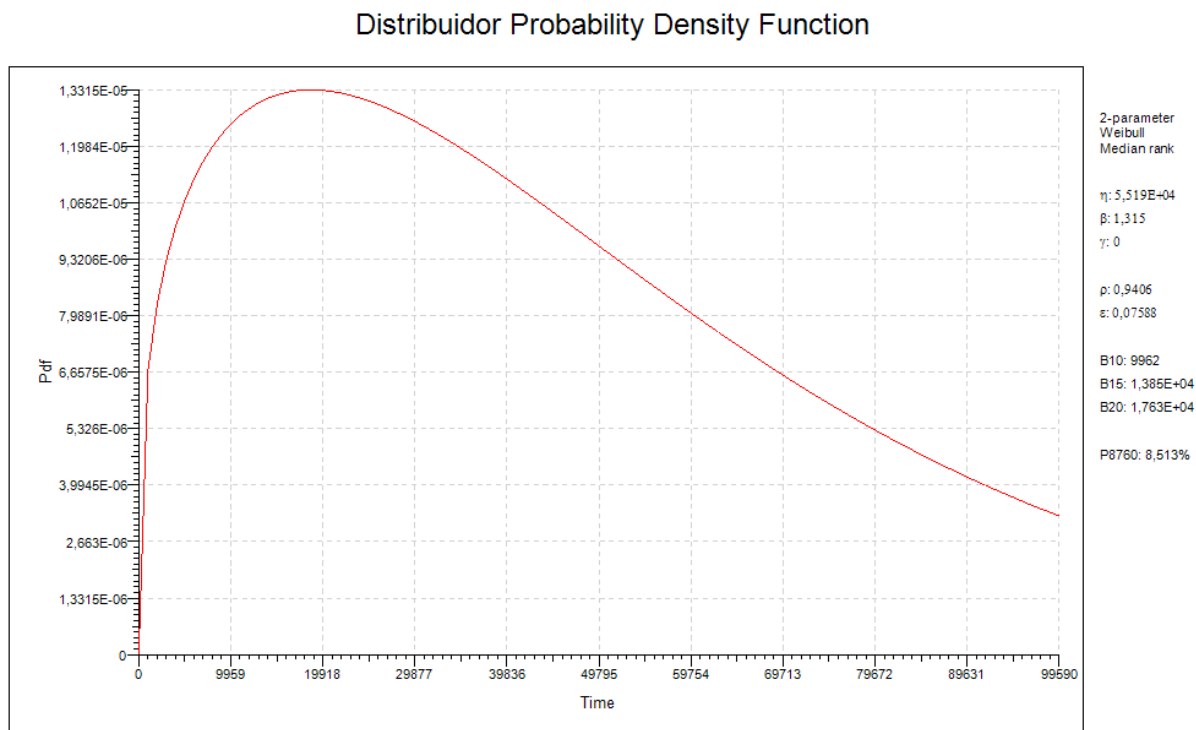
A distribuição que melhor se aplica foi a Weibull de dois parâmetros, pelas figuras abaixo podemos ver que 10% das peças falham em 9962 horas, 15% em 13850 horas e 20% em 17630 horas, já em um ano 8,513% das peças falham.

Figura 8.2.2 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Distribuidor



FONTE: Availability Workbench

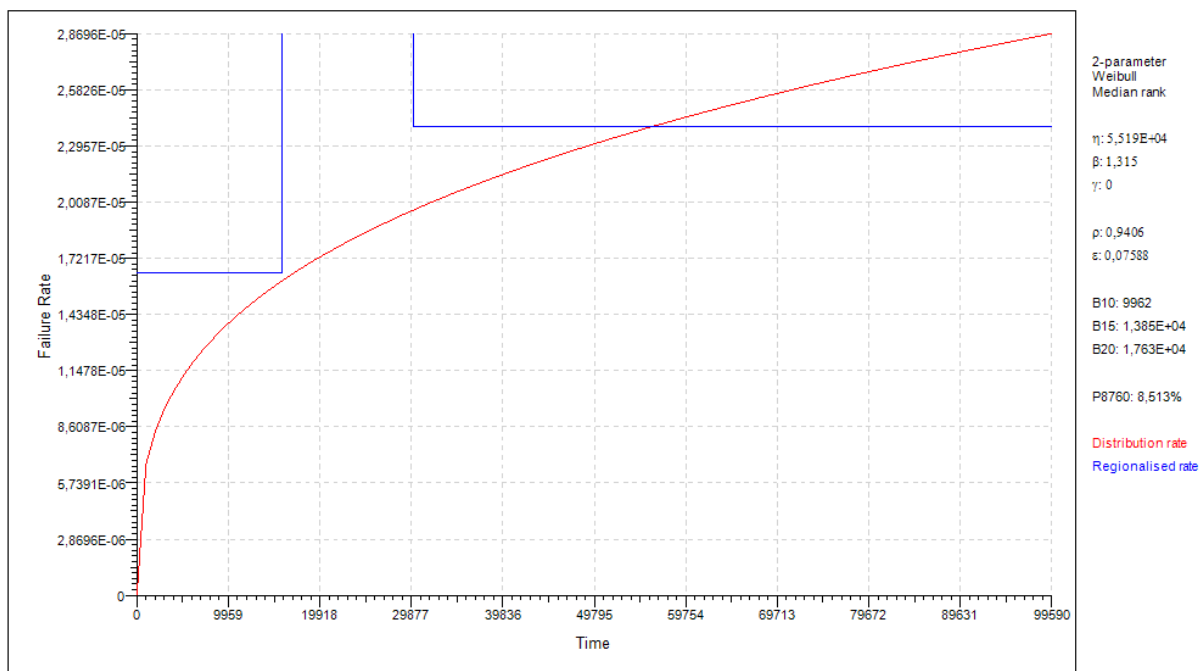
Figura 8.2.1 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade do Distribuidor



FONTE: Availability Workbench



Figura 8.2.3 - Gráfico da Taxa de Falha do Distribuidor  
Distribuidor Failure Rate

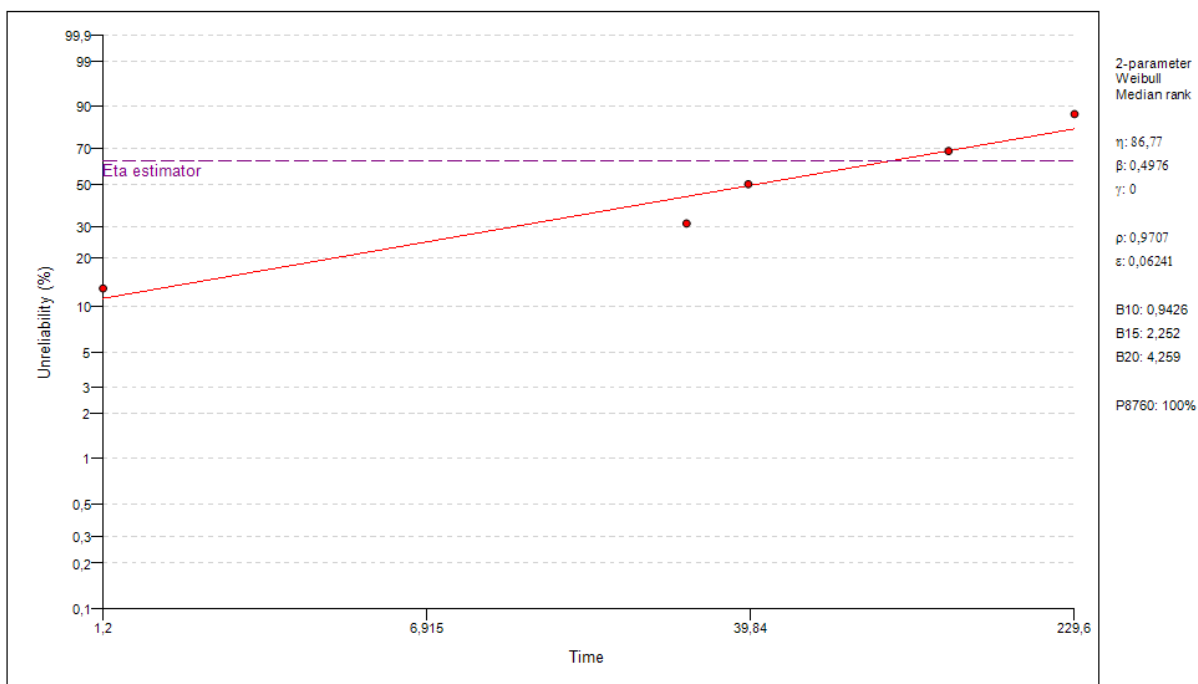


FONTE: Availability Workbench

Analogamente foi modelado o tempo de reparo do mesmo.

Figura 8.2.4 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo de Reparo do Distribuidor

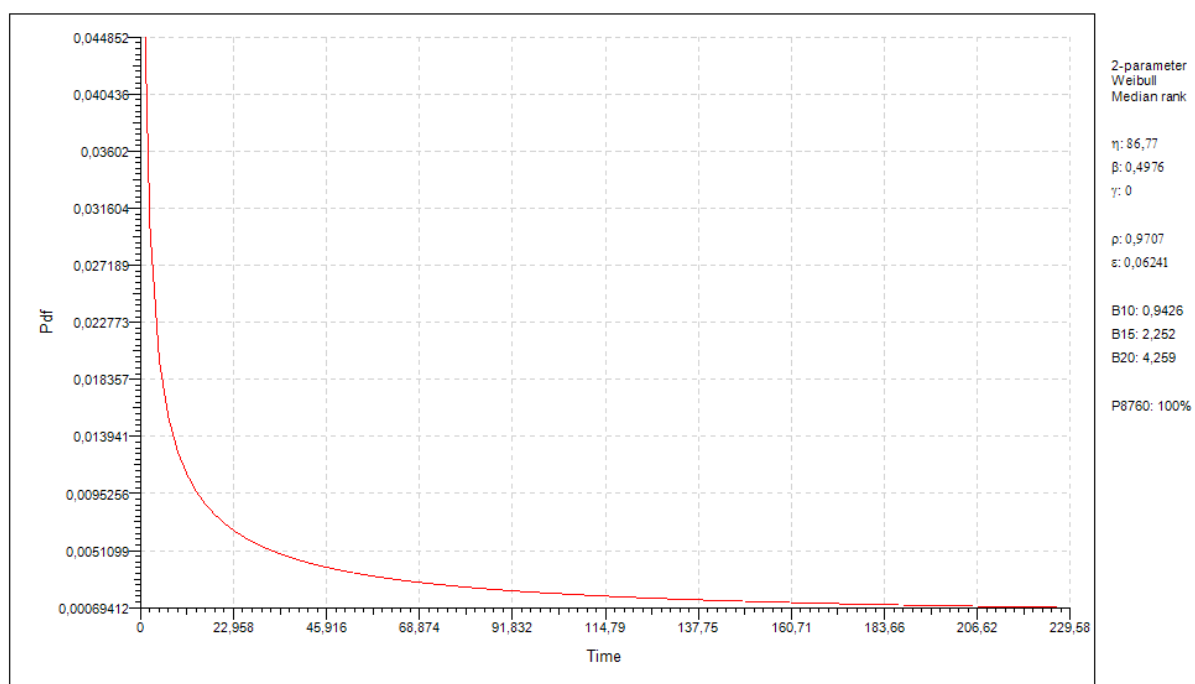
Tempo de Reparo do Distribuidor Cumulative Probability



FONTE: Availability Workbench

Figura 8.2.5 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade do Tempo de Reparo do Distribuidor

### Tempo de Reparo do Distribuidor Probability Density Function

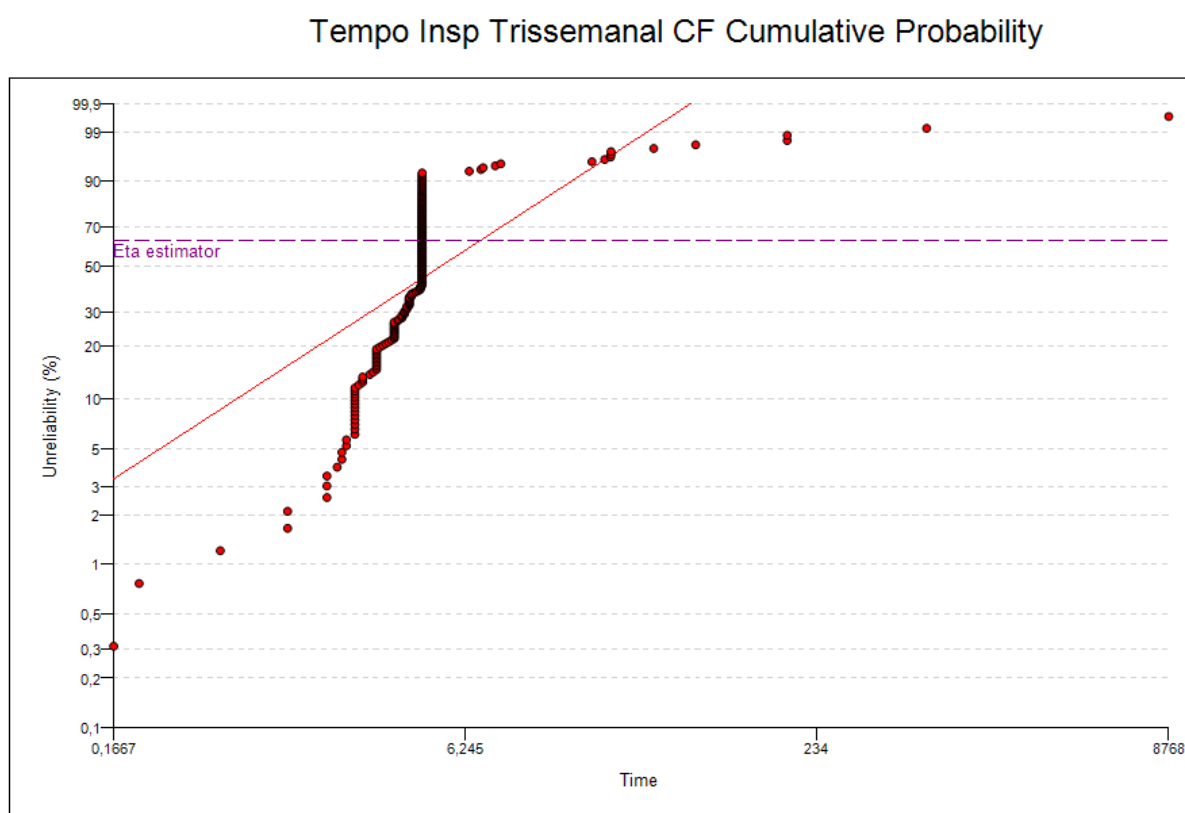


FONTE: Availability Workbench

### 8.3. Manutenções Programadas

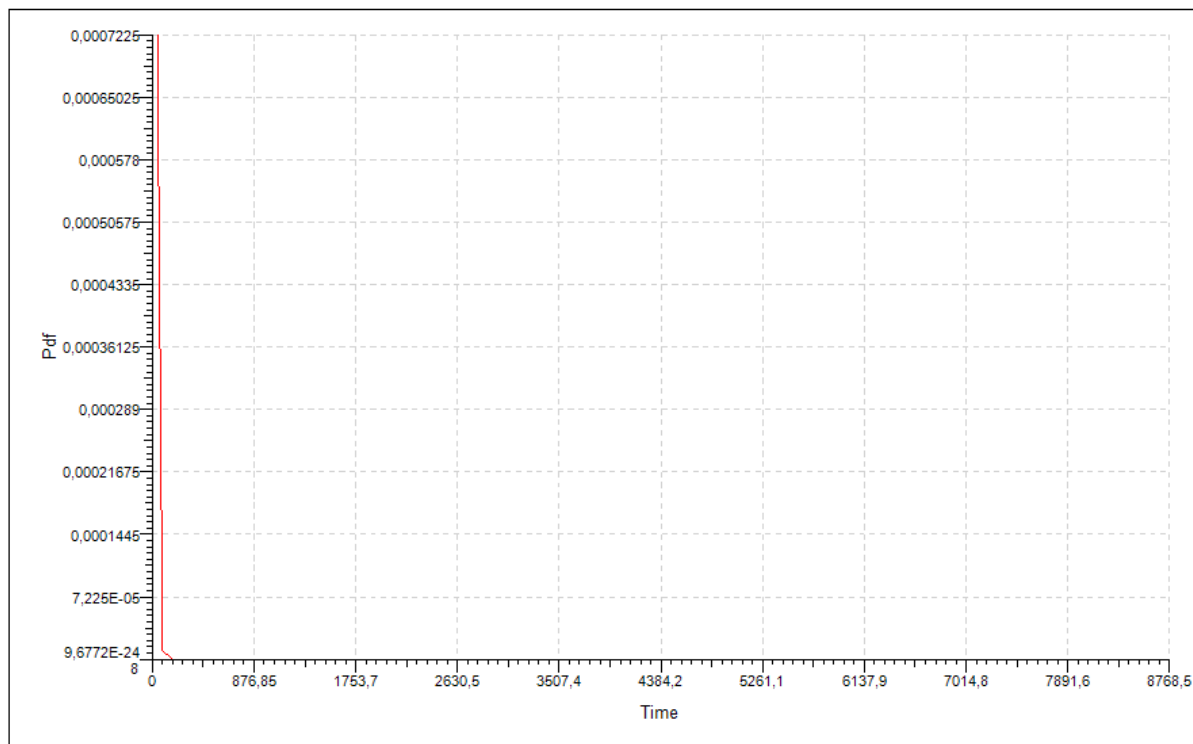
Para aumentar a confiabilidade do modelo de falha do sistema também foram avaliados os tempos gastos nas manutenções preventivas periódicas. O plano de manutenção referente à inspeção na turbina não possuía dados de manutenções anteriores então foi usado o tempo estimado do plano.

Figura 8.3.1 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo da Inspeção Trissemanal na Casa de Força



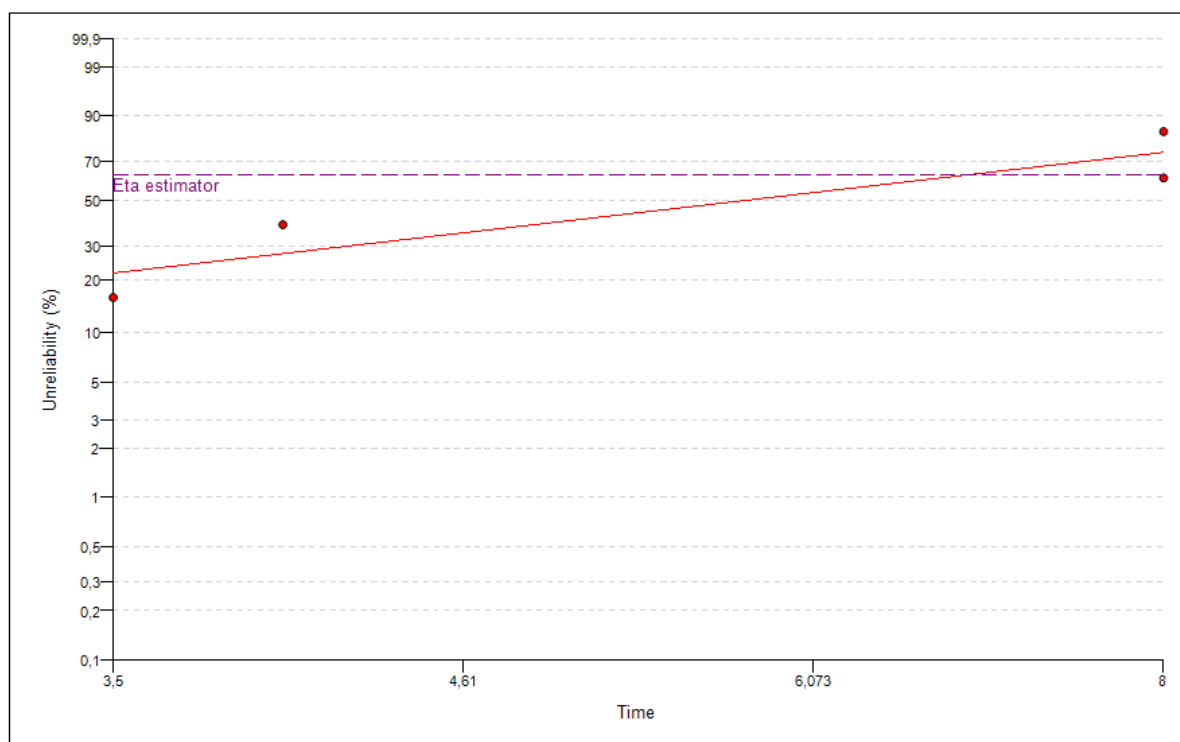
FONTE: Availability Workbench

Figura 8.3.2 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade da Inspeção Trissemanal na Casa de Força  
 Tempo Insp Trissemanal CF Probability Density Function



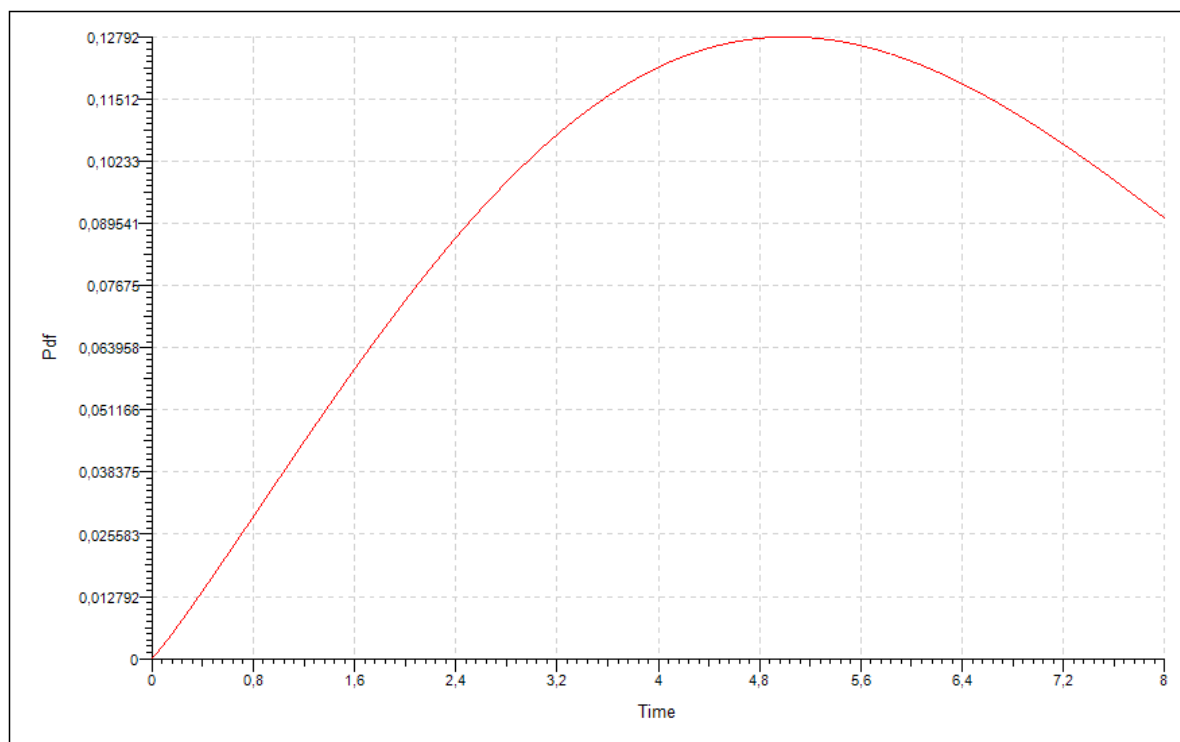
FONTE: Availability Workbench

Figura 8.3.3 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo da Inspeção do Tubo de Sucção  
 Tempo insp tubo de sucção Cumulative Probability



FONTE: Availability Workbench

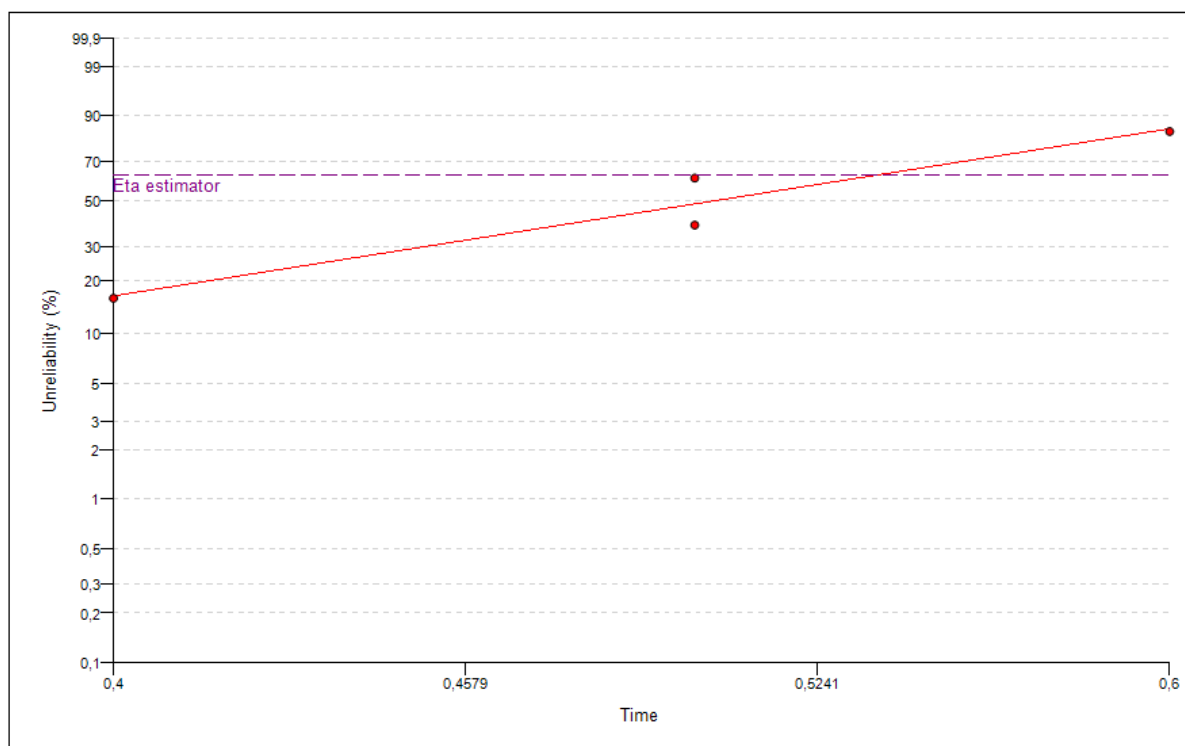
Figura 8.3.4 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade da Inspeção no Tubo de Sucção



FONTE: Availability Workbench

Figura 8.3.5 - Gráfico de Probabilidade Acumulada do Tempo de Manutenção no Conduto Forçado

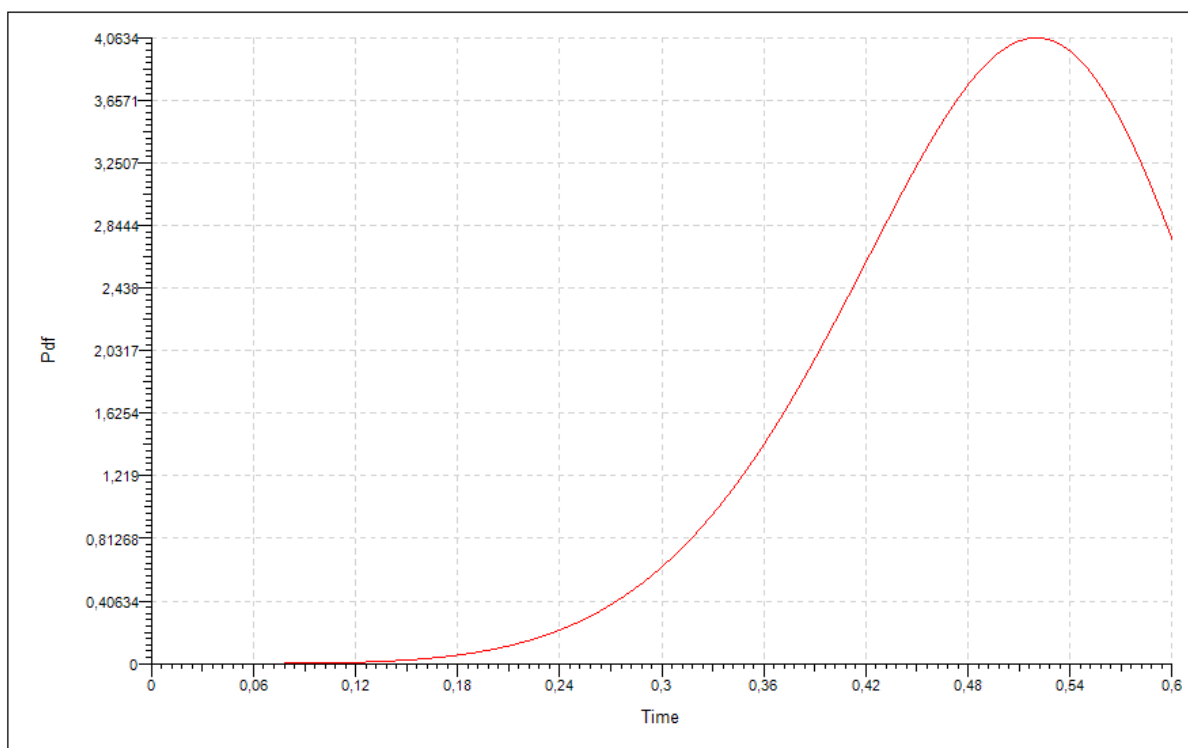
Tempo de manut no conduto forçado Cumulative Probability



FONTE: Availability Workbench

Figura 8.3.6 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade da Inspeção no Conduto Forçado

Tempo de manut no conduto forçado Probability Density Function

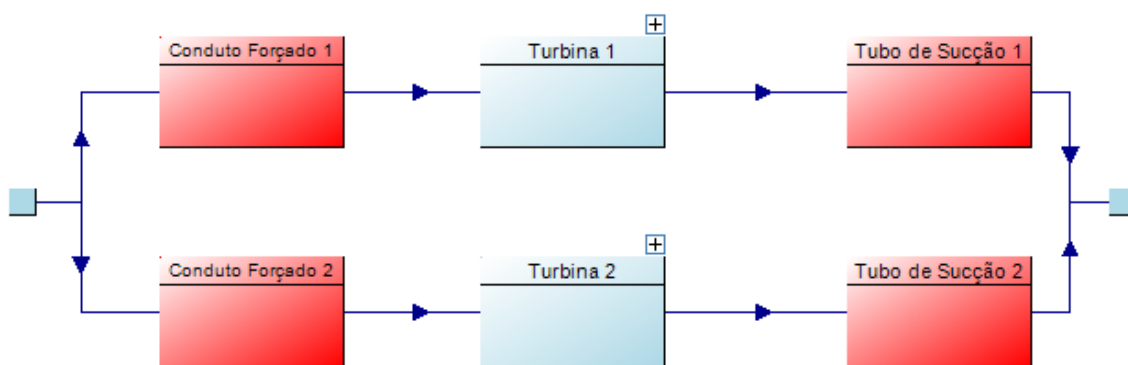


FONTE: Availability Workbench

## 9 Fluxograma

Abaixo encontra-se o fluxograma dos equipamentos avaliados, este foi feito no módulo AvSim do software Availability Workbench. Cada unidade geradora é composta por um conduto forçado, turbina e tubo de sucção, pelo esquema das unidades nota-se que ambas estão em paralelo porém, nesta análise, foi considerado que cada unidade geradora representa 50% da capacidade de geração da usina.

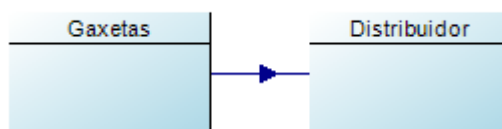
*Figura 9.1 - Fluxograma da Casa de Força*



*FONTE: Availability Workbench*

A cor vermelha foi utilizada para representar os subsistemas onde não foi encontrado registro de falha enquanto a cor azul remete aos que possuíam ao menos uma ocorrência registrada. Os blocos que possuem um símbolo de mais (+) no canto superior direito podem ser expandidos no software revelando um novo fluxograma.

*Figura 9.2 - Fluxograma Expandido da Turbina*



*FONTE: Availability Workbench*

Uma turbina Francis possui inúmeros componentes como caixa espiral, rotor e pás, porém apenas foram considerados neste modelo os componentes que possuíam registros de manutenções corretivas.



## 10 Simulações

As simulações foram realizadas no módulo AvSim considerando um tempo de 10 anos, isto é, 87600 horas.

Para cada plano de manutenção foi realizada uma simulação com o intervalo atual e outra com outro intervalo proposto. Apesar de, numericamente, ser possível propor intervalos maiores que os das segundas simulações sem alterar significativamente os valores de indisponibilidade isto não foi feito pelo fato do banco de dados não ser rico o suficiente para oferecer uma segurança maior ao estudo. O ideal seria repetir estas simulações futuramente.

### 10.1. Inspeção Anual no Tubo de Sucção

*Tabela 3 - Simulação da inspeção no tubo de sucção (intervalo atual)*

Intervalo	1 ano		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs (horas)	Quantidade de Falhas
Tubo de Sucção 1	6.57	24.65	1.00
Tubo de Sucção 2	7.00	23.94	1.00

Tabela 4 - Simulação da inspeção no tubo de sucção (novo intervalo)

Intervalo	3 anos		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs (horas)	Quantidade de Falhas
Tubo de Sucção 1	6.73	5.95	1.00
Tubo de Sucção 2	6.37	5.30	1.00

Pela simulação nota-se que a periodicidade desta inspeção pode ser alterada sem um impacto significativo no tempo nem na quantidade de paradas do equipamento. A indisponibilidade total seria menor já que o número de manutenções diminuiria.

## 10.2. Manutenção Preventiva Anual no Conduto Forçado

*Tabela 5 - Simulação da manutenção preventiva no conduto forçado (intervalo atual)*

Intervalo	1 ano		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs (horas)	Quantidade de Falhas
Conduto Forçado 1	0.00	1.96	0.00
Conduto Forçado 2	0.00	2.00	0.00

*Tabela 6 - Simulação da manutenção preventiva no tubo de sucção (novo intervalo)*

Intervalo	3 anos		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs (horas)	Quantidade de Falhas
Conduto Forçado 1	0.00	0.49	0.00
Conduto Forçado 2	0.00	0.51	0.00

Da mesma forma que na inspeção anterior o tempo entre manutenções pode ser alterado para 3 anos sem impactar no número de falhas enquanto a indisponibilidade total diminuiria já que o número de manutenções seria menor.

### 10.3. Inspeção Bienal na Turbina

*Tabela 7 - Simulação da inspeção bienal na turbina (intervalo atual)*

Intervalo	2 anos		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs	Quantidade de Falhas
Turbina 1	183	37	1
Gaxeta	183	21	1
Distribuidor	-	16	-
Turbina 2	183.3	36.56	1
Gaxeta	183.3	20.56	1
Distribuidor	-	16	-

*Tabela 8 - Simulação da inspeção bienal na turbina (novo intervalo)*

Intervalo	3 anos		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs (horas)	Quantidade de Falhas
Turbina 1	172.8	19	1
Gaxeta	172.8	10.96	1
Distribuidor	-	8	-
Turbina 2	172.8	19	1
Gaxeta	172.8	10.96	1
Distribuidor	-	8	-

Tabela 9 - Simulação da inspeção bienal na turbina (novo intervalo)

Intervalo	4 anos		
Indicador	Tempo de Parada Devido a Falhas (horas)	Tempo de Parada Devido aos PMs (horas)	Quantidade de Falhas
Turbina 1	-	-	
Gaxeta	202	11	1
Distribuidor	-	8	
Turbina 2	-	0	
Gaxeta	202.1	11.2	1
Distribuidor	-	8	-

Neste caso alterar o intervalo das inspeções não teria impacto na disponibilidade geral da usina já que o tempo de parada proveniente de manutenções corretivas aumenta proporcionalmente à redução do tempo utilizado para as preventivas.

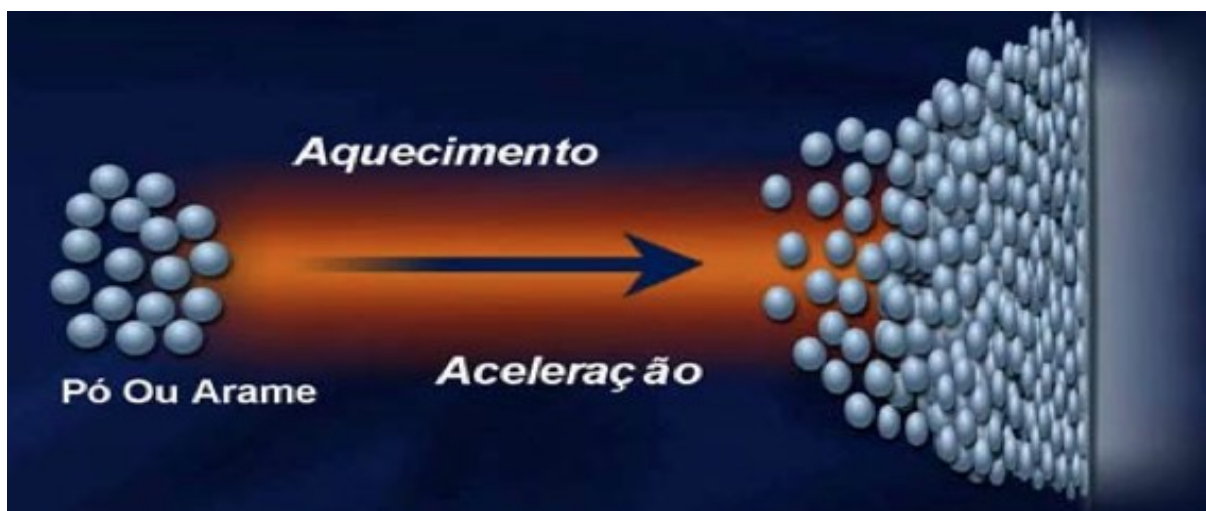
## 11 Revestimento anti-abrasão

No rio onde a UHE Tâmbisa está localizada há uma grande concentração de partículas abrasivas em suspensão, no caso areia de baixa granulometria, que, ao entrar em contato com a turbina, causa retirada de material da superfície, também conhecida como abrasão. Para minimizar esse problema foi escolhido como solução revestir as partes mais afetadas da turbina com carboneto de tungstênio.

Após, em média, 10 anos de operação nestas condições, grande parte dos componentes da turbina estavam chegando ao fim de sua vida útil, logo apenas o rotor foi recuperado por ser financeiramente inviável a fabricação de um novo, porém as palhetas, a tampa da turbina e o anel inferior do distribuidor foram sucateados e novas peças fabricadas. Todos os elementos citados, sejam recuperados ou novos, foram revestidos com carboneto de tungstênio.

A aplicação do revestimento é feita através de um processo de aspersão térmica HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) por ser uma das formas mais eficientes de aplicação já que resulta em revestimentos altamente aderentes de baixa porosidade, o que deve-se à alta velocidade de aplicação (maior que 500m/s) e à baixa temperatura de chama (até 540°C).

*Figura 11.1 - Esquematização da aplicação por HVOF*



*FONTE: Catálogo Rijeza Metalurgia*

*Figura 11.2 - Aplicação de revestimento através do HVOF*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

Com uma resistência à abrasão 5 vezes maior que um tratamento térmico feito por nitretação, por exemplo, graças à sua alta dureza (1350 vickers)<sup>15</sup> e ao alto conteúdo de óxido, que torna os revestimentos mais duros e mais resistentes ao desgaste.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> <http://www.rijeza.com.br/espaco-academico/videos/revestimento-de-carboneto-de-tungstenio>

<sup>16</sup> R.C. Souza, M.P. do Nascimento, H.J.C. Voorwald e W.L. Pigatin. Carbetos de tungstênio, uma alternativa ao cromo duro eletrodepositado. 2000. P.580

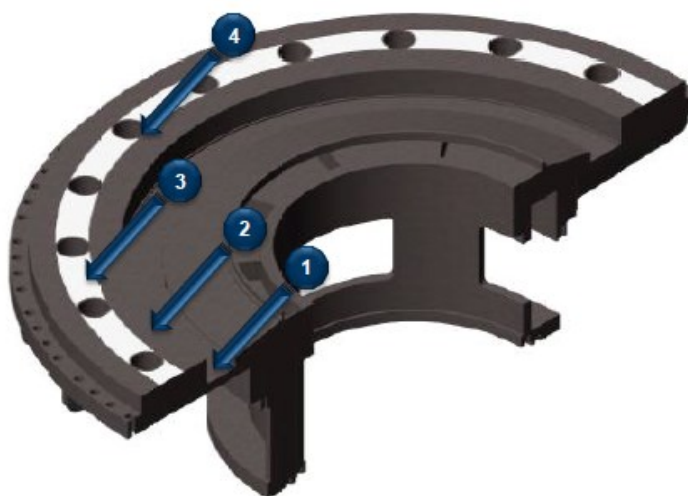
## 12 Projeto de modernização das turbinas

Além da aplicação do revestimento de tungstênio houveram significativas mudanças no projeto das turbinas para evitar a abrasão.

### 12.1. Tampa da turbina

No processo de modernização das turbinas da UHE optou-se por fabricar uma nova tampa modificando o projeto original, já que a mesma estava em um estado de corrosão avançado. Abaixo pode-se visualizar um esquema do projeto original.

*Figura 12.1.1 - Projeto original da tampa da turbina*



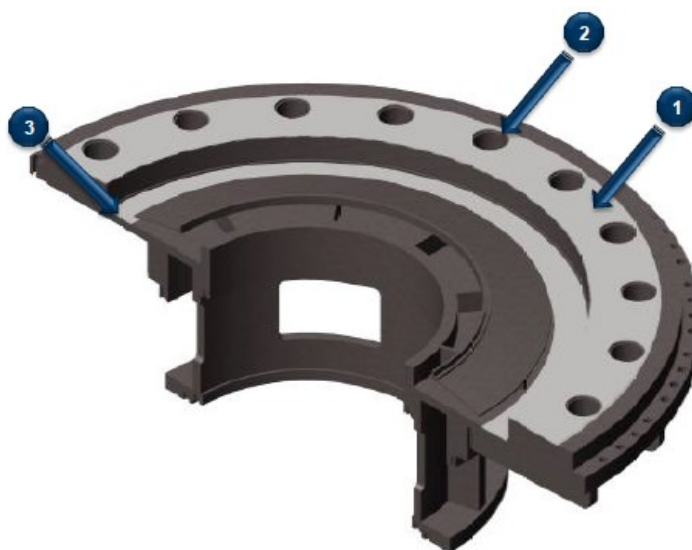
*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

Na figura, representado pelo número 3, estão os anéis de desgaste da turbina que têm a função de impedir que, caso haja algum problema, o rotor, que é a parte principal, seja afetado. Essas placas são compostas pelo aço AISI 304, que é um aço cromo-níquel inoxidável



austenítico, não-temperável, não-magnético.<sup>17</sup> Já na transição entre o anel de desgaste, na figura demarcado pelo número 1, nota-se a falta de revestimento bem como da jusante das placas de desgaste, número 2, que é uma região de alta velocidade, logo é uma área crítica da turbina. O número 4 aponta para a região entre as placas de desgaste que originalmente não possuía proteção e estava bastante prejudicada.

*Figura 12.1.2 - Novo projeto da tampa da turbina*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

---

<sup>17</sup> Sita da empresa Favorit aços especiais. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-304-aisi-304-l>

No novo projeto foi acrescentada uma camada de aço inox martensítico através de soldagem, que possui dureza elevada, tanto na região de alta velocidade quanto na região de transição do anel de desgaste. Pela criticidade o revestimento de carboneto de tungstênio foi acrescentado apenas à jusante das placas de desgaste.

*Figura 12.1.3 - Fabricação da nova tampa da turbina*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

*Figura 12.1.4 - Montagem das tampas da turbina*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

## **12.2. Anel Inferior do Distribuidor**

O distribuidor da turbina tem a finalidade de regular a vazão de água através da abertura ou fechamento de suas palhetas diretrizes, que estão acopladas no anel de regulação.

No projeto de modernização da turbina o anel foi substituído por um novo.

*Figura 12.2.1 - Projeto Original do Anel do Distribuidor*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

No projeto anterior não havia proteção para o mancal da palheta e nem a jusante das placas deslizantes, que apresenta um desgaste severo, ambas estas áreas foram revestidas de aço inox martensítico e carboneto de tungstênio.

*Figura 12.2.2 - Novo Projeto do Anel do Distribuidor*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

*Figura 12.2.3 - Usinagem do Anel Inferior*

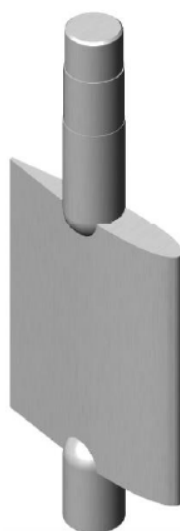


*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

### 12.3. Palhetas diretrizes

As palhetas também foram substituídas por novas para uma melhor adequação ao novo projeto. Foi instalado um colar no munhão da palheta com o objetivo de conferir uma maior proteção mecânica ao seu mancal, além disso foi incluído um canal para a instalação de vedação complementar, também visando a proteção dos mancais quanto aos abrasivos. O raio de transição entre a palheta e o munhão também foi modificado com o objetivo de suavizar a transição e reduzir o ataque dos abrasivos nessa região, que também recebeu carboneto de tungstênio junto com toda a superfície hidráulica da palheta.

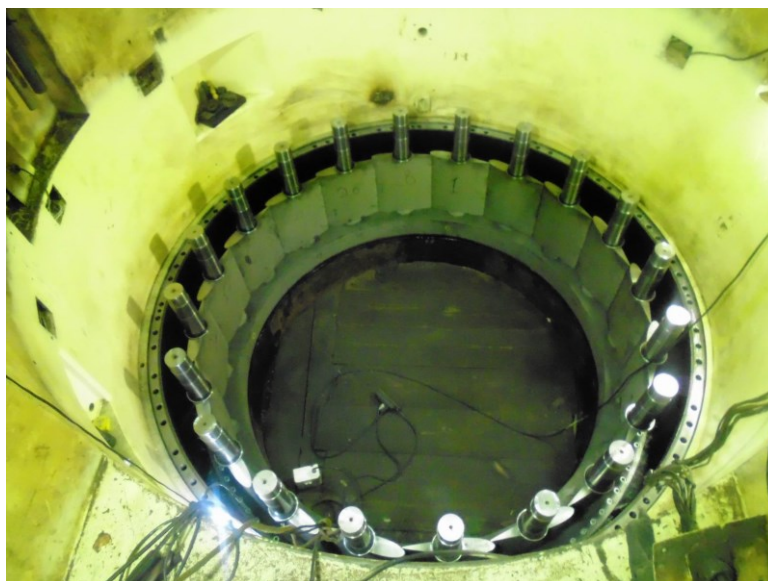
*Figura 12.3.1 - Projeto Original da Palheta do Distribuidor*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*



*Figura 12.3.2 - Montagem das Palhetas Novas*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

#### **12.4. Rotor**

O rotor da turbina é o responsável por transformar a energia hídrica em mecânica. Como dito anteriormente, ele foi revitalizado e não substituído por um novo. Foi aplicado revestimento de carboneto de tungstênio tanto na cinta como nas bordas das saídas das pás, com o objetivo de protegê-los da abrasão.

*Figura 12.4.1 - Croqui Isométrico do Rotor*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

*Figura 12.4.2 - Aplicação do Revestimento nas Pás do Rotor*



*FONTE: Empresa responsável pela UHE*

### 13 Conclusões

Foi sugerido à empresa as alterações nos planos de manutenção, porém é importante que, depois de um tempo em vigor, os dados sejam novamente analisados e as simulações refeitas para validar ou não as novas periodicidades. Não foi avaliada a periodicidade da Inspeção Bissemanal na Usina pela mesma conter equipamentos em seu escopo que não fazem parte da análise.

As estimativas das curvas P-F através da experiência do supervisor da usina não é a forma ideal de fazer as análises, com o fim de recolher dados para que, no futuro, esta possa ser calculada foi criado nas ordens de serviço de manutenções corretivas um campo para indicar como a falha foi descoberta.

A aplicação de revestimento de carboneto de tungstênio para evitar abrasão é uma prática relativamente nova no mercado, futuramente deve-se analisar os ganhos que esta alteração no projeto trouxe às turbinas.



## 14 Bibliografia

- 1- BIATO, A. A. R. “Fundamentos de Confiabilidade”, Ano desconhecido.
- 2- BILLINTON, R.; ALLAN, R. “Reliability evaluation of engineering systems – Concepts and techniques”, Springer, 1992
- 3- DHILLON, B.S. “Reliability systems in design and operation”, Van Nostrand Reinhold, 1982.
- 4- EBELING, C. E. “An introduction to reliability and maintainability engineering”, Waveland Press, 2010.
- 5- [http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3635/1/2008\\_RodrigoQueirozSouza\\_original.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3635/1/2008_RodrigoQueirozSouza_original.pdf)
- 6- <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-304-aisi-304-l>
- 7- <https://www.techopedia.com/definition/8281/mean-time-to-failure-mttf>
- 8- LEES, F.P. “Loss prevention in the process industries”, Butterworth-Heinemann, 1991.
- 9- LEKATOU, A.; SIOULAS, D.; KARANTZALIS, A.E.; GRIMANELIS, D. “A comparative study on the microstructure and surface property evaluation of coatings produced from nanostructured and conventional WC–Co powders HVOF-sprayed on Al7075”, Surface and Coatings Technology, vol. 282, 2015.
- 10- LIMA, G. C., - “Confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, produção e avaliação de custos de sistemas para gestão de ativos”, Aremas, 2014.
- 11- RAPOSO, J. L. O. “Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: uma proposta para uso e análise de risco no diagram de decisão”, Dissertação de Mestrado, 2004.

12- SOUZA, R.C.; DO NASCIMENTO, M.P.; VOORWALD, H.J.C.; PIGATIN, W.L.

“Carbeto de tungstênio, uma alternativa ao cromo duro eletrodepositado”, IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, 2000, p. 575-582.