



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PEDRO IGOR CARVALHO MOREIRA**

**MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE DE UMA UNIDADE  
GERADORA DA UHE-TUCURUÍ**

Belém - PA

2013

**PEDRO IGOR CARVALHO MOREIRA**

**MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE DE UMA UNIDADE  
GERADORA DA UHE-TUCURUÍ**

Dissertação apresentada como requisito a conclusão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Engenharia de Produção

ORIENTADOR: Prof. Dr. Renato Martins das Neves

Belém - PA

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Moreira, Pedro Igor Carvalho, 1980-  
Modelagem da disponibilidade de uma unidade  
geradora da UHE Tucuruí / Pedro Igor Carvalho  
Moreira. - 2013.

Orientador: Renato Martins Neves.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2013.

1. Sistemas de energia elétrica - Tucuruí  
(PA). 2. Sistemas de energia elétrica - Modelos  
matemáticos. 3. Sistema de energia elétrica -  
Confiabilidade. 4. Confiabilidade (Engenharia) -  
Tucuruí (PA). 5. Usina Hidrelétrica de Tucuruí.  
I. Título.

CDD 23. ed. 621.31098115

---



**MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE DE UMA UNIDADE GERADORA DA UHE - TUCURUÍ.**

AUTOR:

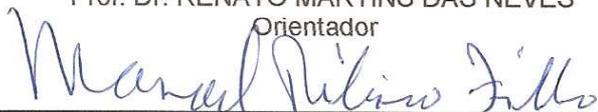
**PEDRO IGOR CARVALHO MOREIRA**

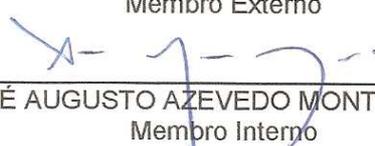
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA EM:     /     /

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. RENATO MARTINS DAS NEVES  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. MANOEL RIBEIRO FILHO  
Membro Externo

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. ANDRÉ AUGUSTO AZEVEDO MONTENEGRO DUARTE  
Membro Interno

Visto:

\_\_\_\_\_  
Prof. CLAUDIO JOSÉ CAVALCANTE BLANCO, Ph.D  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico este trabalho aos familiares e amigos pelo apoio em todos os momentos e, em especial, à minha esposa Viviane e minhas filhas Elisa e Isadora.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo amor e por toda a formação recebida.

À minha esposa, Viviane, por todo o apoio na criação de nossos filhos durante os períodos de ausência.

À Eletrobras Eletronorte pela oportunidade de avanço profissional.

Ao Prof<sup>o</sup> Renato Neves pela atenção e orientação na realização deste trabalho.

À Prof<sup>a</sup> Mariana Carneiro por suas contribuições na revisão do trabalho.

Aos Prof<sup>o</sup> Enrique Droguett e Prof<sup>a</sup> Dayse Duarte pela oportunidade de participar de relevantes pesquisas no âmbito da Universidade Federal de Pernambuco.

A todos os amigos, sem os quais a vida perde o sentido.

"Nós somos o que fazemos repetidamente,  
a excelência não é um feito, e sim, um  
hábito."

(Aristóteles)

## RESUMO

Com o advento do marco regulatório do Setor Elétrico Brasileiro, a partir de 2004, os agentes que atuam neste mercado têm experimentado um acirramento nas disputas por novos negócios, evidenciando um aumento de competitividade. A Disponibilidade dos Ativos Físicos e os Custos com Manutenção se apresentam como os pontos chave para a competitividade dos agentes. O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de Análise de Disponibilidade de Sistemas Reparáveis, durante as etapas de projeto ou de operação do sistema, contemplando a mensuração dos Custos com Manutenção versus o Desembolso com Aquisição para um nível esperado de desempenho. A metodologia para a Análise de Disponibilidade sugerida se utiliza da construção do Diagrama de Blocos do Sistema com respectivas descrições funcionais, exportação das informações para o formato de Árvore de Sucesso, composta de portas lógicas dos tipos "E" e "OU" as quais caracterizam um subsistema integrante do sistema principal. O analista pode reavaliar a topologia do sistema, agregando ou retirando redundâncias com a finalidade de ajustar o desempenho do projeto aos requisitos de Disponibilidade, Custo de Aquisição e Custos de Manutenção. Como resultados do trabalho foram identificadas lacunas normativas que definem a forma de controle do desempenho dos ativos, estabelecida uma sistemática de integração entre técnicas de modelagem de confiabilidade e disponibilidade, estabelecidos e incorporados indicadores de desempenho de Manutenção Programada em um agente do mercado, foram modelados e discutidos diferentes cenários para um Sistema de Circulação de Óleo de Mancal e foi aplicado o modelo a toda uma Unidade Geradora Hidráulica por meio da implementação computacional do modelo aos componentes críticos dos principais sistemas.

**Palavras-chave: Disponibilidade, Confiabilidade, Manutenibilidade e Modelagem.**

## **ABSTRACT**

Since 2004, the regulatory rules in the Brazilian Electricity Sector has changed. The agents who act in this market have experienced a rise in new business disputes, showing an increase in competitiveness. The availability of physical assets and maintenance costs are presented as key points of these agents competitiveness. This work aims to present a methodology of Availability Analysis of Repairable Systems during the design or operational phases, covering the measurement of maintenance costs versus the acquisition costs to an expected performance level. The suggested methodology takes the System Block Diagram and exports to the Successful Tree Analysis format, composed by logic gates "AND" and "OR" where each represents a subsystem in the main system. The analyst may re-evaluate the system's topology, adding or removing redundancies in order to adjust the performance to the requirements of availability, acquisition and maintenance costs. As results of this work were identified gaps in the standards rules which defines how to control the assets performance, was established a systematic integration of modeling techniques for reliability and availability, performance indicators of Scheduled Maintenance were incorporated, different scenarios were modeled for an Oil Circulation System and was applied to an entire Hydraulic Generating Unit by modeling the critical components in the main systems.

**Keywords: Availability, Reliability, Maintainability and Modeling.**

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 <i>Motivação</i> .....	1
1.2 <i>Questão de Pesquisa</i> .....	3
1.3 <i>Hipóteses</i> .....	4
1.4 <i>Pressupostos</i> .....	4
1.5 <i>Objetivos</i> .....	4
<b>2. Metodologia</b> .....	<b>6</b>
2.1 <i>Tipologia da pesquisa</i> .....	6
2.2 <i>Delineamento da pesquisa</i> .....	7
2.3 <i>Procedimentos da pesquisa</i> .....	8
<b>3. Referencial teórico</b> .....	<b>18</b>
3.1 <i>Avaliação do Desempenho de Sistemas</i> .....	18
3.2 <i>Definições</i> .....	20
3.3 <i>Indicadores de Processo</i> .....	23
3.4 <i>Indicadores de Resultados</i> .....	25
3.5 <i>Métodos de Estimação de Parâmetros</i> .....	28
3.6 <i>Modelo de Crescimento da Confiabilidade</i> .....	29
3.7 <i>Diagramas de Blocos de Confiabilidade</i> .....	31
3.8 <i>Árvore de Falhas e Árvore de Sucesso</i> .....	34
3.9 <i>Análise Markoviana</i> .....	37
3.10 <i>Método Lambda-Tau</i> .....	40
<b>4. Modelagem Proposta</b> .....	<b>44</b>
4.1 <i>Análise Dinâmica da Árvore de Sucesso do Sistema</i> .....	44
4.2 <i>Hibridismo entre Árvore de Sucesso e Análise de Markov</i> .....	45
4.3 <i>Cadeia de Markov com 3 estados</i> .....	46
4.4 <i>Manipulação de Interseções nas Probabilidades Resultantes</i> .....	48
4.5 <i>Análise de Tendências das Taxas de Transição</i> .....	49
4.6 <i>Resposta do Modelo</i> .....	51
<b>5. Implementação Computacional</b> .....	<b>55</b>
5.1 <i>Sistema jMyNHPP</i> .....	55
5.2 <i>Sistema A<sup>2</sup> - Availability Analysis</i> .....	59

<b>6.</b>	<b>Estudos de Caso .....</b>	<b>69</b>
6.1	<i>Estudo de Caso 1 – Sistema de Circulação de Óleo do MGG.....</i>	<i>69</i>
6.2	<i>Estudo de Caso 2 – Sistemas Principais de uma UGH .....</i>	<i>79</i>
<b>7.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>94</b>
<b>8.</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>96</b>
<b>9.</b>	<b>Apêndice .....</b>	<b>100</b>
9.1	<i>Script Maple® para resolução da Cadeia de Markov com 03 estados .....</i>	<i>101</i>

## Lista de Abreviaturas

A <sup>2</sup>	<i>Availability Analysis</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAGE	Associação das Empresas de Geração de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BSI	<i>British Standards Institution</i>
ELB	Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ELN	Eletrobras Eletronorte: Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
EUA	Estados Unidos da América
FS	Fator de Serviço
HD	Horas Disponíveis
HIF	Horas de Indisponibilidade Forçada
HIP	Horas de Indisponibilidade Programada
HP	Horas do Período
HS	Horas em Serviço
ID	Índice de Disponibilidade
JIPM	<i>Japan Institute of Plant Maintenance</i>
MGG	Mancal Guia do Gerador
MM	Módulo SAP - <i>Materials Management</i>
MP	Pilar - Manutenção Planejada
MP	Informações - <i>Maintenance Prevention</i>
MRE	Mecanismo de Realocação de Energia
MTBF	Tempo Médio entre Falhas
MTBP	Tempo Médio entre Programadas
MTTP	Tempo Médio de Reparo Programado
MTTR	Tempo Médio de Reparo Forçado
NDF	Número de Desligamentos Forçados
NDP	Número de Desligamentos Programados
NHPP	Processo Não-homogêneo de Poisson
NUREG	<i>U.S. Nuclear Regulatory Commission</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAS	<i>Publicly Available Specification</i>

PM	Módulo SAP - <i>Plant Maintenance</i>
RBD	<i>Reliability Block Diagrams</i>
RCM	<i>Reliability Centred Maintenance</i>
SAP	<i>Systems Applications and Products</i>
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
TDF	Taxa de Desligamentos Forçados
TDP	Taxa de Desligamentos Programados
TEIF	Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada
TEIP	Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada
TEO	Tarifa de Energia de Otimização
TF	Taxa de Falhas
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
UGH	Unidade Geradora Hidráulica
UHE	Usina hidrelétrica

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de Métodos Indiretos de Modelagem .....	20
Tabela 2 – Exemplo de cálculo de confiabilidade para sistema em série.....	33
Tabela 3 – Resposta do modelo para os dados do <i>Exemplo</i> . .....	54
Tabela 4 – Resultados numéricos do modelo para exportação.....	63
Tabela 5 – Dados agregados da resposta do modelo para geração de relatórios.....	66
Tabela 6 – Estudo de Caso 1 – Comparativo entre os resultados das diferentes topologias. ....	77
Tabela 7 – Agrupamento de UGH por potência para comparativo de indicadores.....	86
Tabela 8 – Dados de entrada do modelo.....	87
Tabela 9 – Resposta do modelo (indicadores e métricas) .....	88
Tabela 10 – Erro percentual comparado Histórico x Modelo. ....	89
Tabela 11 – Análise de sensibilidade do modelo. ....	91
Tabela 12 - Resultado do NDF para o Sistema do Gerador com foco no componente “Escovas” com parâmetro de forma original.....	92
Tabela 13 - Resultado do NDF para o Sistema do Gerador com foco no componente “Escovas” com parâmetro de forma alterado. ....	92

## Lista de Figuras

Figura 1 - Delineamento da Pesquisa .....	7
Figura 2 - Exemplo de bloco para composição do diagrama. ....	32
Figura 3 - Exemplo de diagrama para sistema em série .....	32
Figura 4 - Exemplo de diagrama de blocos de sistema em paralelo.....	33
Figura 5 - Cadeia de Markov com 2 estados .....	38
Figura 6 - Fluxo de Informações do Modelo .....	44
Figura 7 - Cadeia de Markov com 3 estados .....	46
Figura 8 - (a) Sistema único – Sem interseção; (b) Sistema composto – Diagrama de Venn..	48
Figura 9 - Parcelas das probabilidades para 03 (três) estados. ....	48
Figura 10 - Interface do NetBeans IDE 6.5.1 .....	55
Figura 11 - Ajuste de dados no <i>software</i> jMyNHPP. ....	56
Figura 12 - Simulação de instantes de desligamentos para validação no jMyNHPP.....	57
Figura 13 - Previsão do número de desligamentos com base no ajuste do jMyNHPP. ....	58
Figura 14 - Interface do sistema A <sup>2</sup> - <i>Availability Analysis</i> .....	59
Figura 15 - Aba Edição do sistema A <sup>2</sup> .....	60
Figura 16 - Aba Análise Topológica do sistema A <sup>2</sup> . ....	61
Figura 17 - Aba Análise Nodal do sistema A <sup>2</sup> .....	62
Figura 18 - Aba Análise de Tendência do sistema A <sup>2</sup> - Probabilidade do Topo.....	63
Figura 19 - Análise de Tendências para os Cortes Mínimos da Árvore de Sucesso. ....	64
Figura 20 - Aba Análise de Estados do sistema A <sup>2</sup> . ....	65
Figura 21 - Aba Diagnóstico do sistema A <sup>2</sup> . ....	67
Figura 22 - Caixa de diálogo para entrada do Horizonte de Análise.....	67
Figura 23 - Exemplo de relatório gerado para topologia pelo sistema A <sup>2</sup> .....	68
Figura 24 - Foto do arranjo do Sistema de Circulação de Óleo do Mancal Guia do Gerador..	71
Figura 25 - Desenho do arranjo do Sistema de Circulação de Óleo do MGG .....	71
Figura 26 - Exemplo 6.1 – 01 ALM, 01 MB, 02 FIL, 01 TC e 01 INS.....	72
Figura 27 - Exemplo 6.2 – 01 ALM, 01 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS.....	72
Figura 28 - Exemplo 6.3 – 01 ALM, 02 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS.....	73
Figura 29 - Exemplo 6.4 – 01 ALM, 03 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS.....	73
Figura 30 - Exemplo 6.5 – 01 ALM, 02 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS – RCM.....	74
Figura 31 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.1.....	74
Figura 32 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.2.....	74

Figura 33 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.3.....	75
Figura 34 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.4.....	75
Figura 35 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.5, apresentado na tela do Sistema A <sup>2</sup> .....	75
Figura 36 - Corte de Unidade Geradora Hidráulica da UHE Tucuruí.....	79
Figura 37 - RBD esquemático de uma UHE com UGH em paralelo.....	83
Figura 38 - Diagrama de Blocos de Confiabilidade da UGH.....	84
Figura 39 - Árvore de Sucesso da UGH.....	84
Figura 40 - Árvore de Sucesso da UGH modelada. ....	87

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Evolução da probabilidade dos estados 1 e 0.....	40
Gráfico 2 - Exemplo de resposta assintótica para o modelo.....	50
Gráfico 3 - Resposta do modelo submetido à parâmetro de forma. ....	51
Gráfico 4 - Curvas dos estados agregados da resposta do modelo.....	66
Gráfico 5 - Evolução dinâmica da Disponibilidade e demais estados do sistema.....	90
Gráfico 6 - Evolução dinâmica da Disponibilidade na Análise de Sensibilidade .....	93

## **1. Introdução**

### ***1.1 Motivação***

No atual contexto do setor elétrico brasileiro observa-se uma crescente competitividade entre os agentes geradores de energia elétrica. O aumento da competitividade se deve, basicamente, ao marco regulatório do setor estabelecido a partir de 2004. O marco regulatório torna claras as atribuições, responsabilidades e formas de controle impostas aos agentes de geração. A geração de energia elétrica é um processo com alta sazonalidade, tanto de curto quanto de longo prazo.

A disponibilidade operacional de geração de energia é, atualmente, o principal indicador de desempenho das instalações de geração de energia. Os Procedimentos de Rede do ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro estabelecem as definições, fórmulas e orientações para a contabilização dos indicadores de desempenho das instalações de geração de energia. O setor de energia sempre esteve na vanguarda da utilização de métodos analíticos de modelagem da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade juntamente com os setores militar e aeroespacial.

Segundo Blanchard e Fabrycky (1998), os engenheiros responsáveis pelo projeto e desenvolvimento de um sistema devem ser sensíveis, não só às necessidades e requisitos funcionais, mas, sobretudo, aos resultados que serão obtidos durante a fase operacional do sistema. Assim sendo, o projeto não deve se resumir apenas em transformar uma necessidade em uma configuração definitiva de um sistema, mas considerar também as consequências futuras em relação a aspectos como produtividade, confiabilidade, manutenibilidade, sistemas de apoio logístico, custos e complexidade de desativação do sistema e o custo total de vida útil do sistema.

Segundo Carvalho (2006), o desempenho de um sistema é genericamente caracterizado pela qualidade de seus componentes e pela forma a qual estes estão interligados. Considerando a crescente complexidade dos sistemas em geral e o aumento significativo da dependência da sociedade como um todo destes sistemas, torna-se cada vez mais crítica a necessidade de otimizar a confiabilidade e a segurança dos mesmos.

A análise de confiabilidade é normalmente realizada por meio de modelos. Um modelo, por definição, é uma representação da realidade sendo, portanto, sujeito à imperfeições. O modelo

deve conter as informações essenciais sobre o sistema em função da aplicação do mesmo sendo que o uso que se pretende fazer do modelo determina o grau de formalismo matemático requerido.

A complexidade do modelo dependerá do grau de representação a respeito dos fenômenos envolvidos. Observa-se que a capacidade de representação da realidade de uma técnica de modelagem aumenta proporcionalmente com a complexidade de sua análise. Portanto, a escolha de uma metodologia é condicionada à determinação de objetivos, bem como a um estudo da relação custo-benefício.

Um dos campos de estudo em Engenharia de Confiabilidade é a análise de sistemas reparáveis. Uma referência clássica é a de Ascher e Feingold (1984), onde um sistema reparável é definido como aquele que, após falhar em realizar pelo menos uma de suas funções, pode ser reconduzido (reparado) para o estado em que ele está apto a realizar todas as suas funções através de qualquer procedimento que não seja a substituição total do mesmo.

Tradicionalmente, a literatura de sistemas reparáveis trata da modelagem de tempos de falha apenas utilizando a teoria de processos pontuais. As classes de processos estocásticas mais utilizadas e aplicadas na modelagem de sistemas reparáveis são o Processo de Renovação (PR), incluindo o Processo Homogêneo de Poisson (PHP), onde o tempo de falha é assumido seguir uma distribuição exponencial com taxa constante, e o Processo Não-Homogêneo de Poisson (PNHP), com taxa de ocorrência de falhas ou desligamentos (ROCOF) variável.

O Processo Não-Homogêneo de Poisson quando se utiliza da Lei de Potência (*Power Law*) como modelo de variação da taxa de ocorrência de desligamentos é também chamado de modelo *Crow-AMSAA*.

Um modelo de confiabilidade de um sistema reparável inclui usualmente a confiabilidade dos componentes, a arquitetura do sistema, o esquema físico de operação, bem como aspectos relacionados à manutenibilidade e práticas de manutenção utilizadas. É desejável ainda que, na medida do possível, também inclua fatores subjetivos como erro humano e atrasos logísticos, dentre outros. (LOGMAN;WANG, 2002)

Segundo Mettas (2001), outra classificação possível para os modelos de confiabilidade seria a subdivisão em métodos analíticos e numéricos. O enfoque analítico envolve a determinação de uma expressão matemática que descreva a confiabilidade do sistema através da confiabilidade de seus componentes. Por exemplo, no caso de três unidades estatisticamente

independentes em série, a confiabilidade do sistema ( $R_{SISTEMA}(t)$ ) é fornecida pelo produto da confiabilidade de seus componentes.

Embora os métodos analíticos para cálculo de confiabilidade forneçam valores exatos, a complexidade de suas expressões matemáticas faz com que estes sejam, as vezes, intratáveis. Neste caso, podem ser empregados métodos numéricos também definidos como métodos de simulação. O termo simulação refere-se a uma família de técnicas baseadas em cálculos computacionais que objetivam reproduzir o comportamento de um dado sistema.

Entretanto, devido a complexidade destas expressões, a literatura propõe algumas hipóteses simplificadoras que não comprometem o resultado final. Esta aproximação é conhecida como Metodologia Lambda-Tau.

A Metodologia Lambda-Tau é adequada para modelar características gerais dos sistemas estudados, considerando suas características no estado estacionário.

O método não se mostra completamente aderente aos modelos de negócio de Geração e Transmissão de Energia no contexto brasileiro, sendo pela não contabilização de outros estados possíveis do sistema, pela não representação dinâmica da Disponibilidade e pela não consideração de variação, ao longo do tempo, das taxas de desligamento. Neste contexto, este trabalho visa gerar um modelo para uma Análise de Disponibilidade que atenda tais necessidades e estenda sua aplicação, contemplando a dimensão financeira.

### *1.2 Questão de Pesquisa*

Serão utilizados pressupostos, admitidos como verdade, para a delimitação do problema, de forma a restringir à manipulação das equações a um nível tratável e inteligível para o tipo de produto esperado deste trabalho científico.

A pergunta básica a ser respondida é: **“Pode-se modelar a disponibilidade operacional e o custo de manutenção com base nos dados contidos nos Sistemas Informatizados de Gestão?”**

### ***1.3 Hipóteses***

A hipótese básica advém diretamente da Questão de Pesquisa, sendo ela:

**Hipótese 1** – Com base nas informações contidas nos sistemas informatizados de gestão da operação e manutenção é possível simular a Disponibilidade de um Sistema Produtivo de Energia Elétrica.

### ***1.4 Pressupostos***

**Pressuposto 1** – Os tempos entre desligamentos forçados e programados dos equipamentos aderem a uma distribuição com taxa variável, em função do tempo de operação;

**Pressuposto 2** – Os tempos de reparo forçado e programado aderem a uma distribuição com taxa constante, em função do tempo de operação;

**Pressuposto 3** – Os estados operacionais são conhecidos e seus instantes de transição são corretamente registrados.

### ***1.5 Objetivos***

Segundo Gil (2008) há muitas razões que determinam a realização de uma pesquisa. Podem, no entanto, ser classificadas em dois grandes grupos: razões de ordem intelectual e razões de ordem prática. As primeiras decorrem do desejo de conhecer pela própria satisfação de conhecer. As últimas decorrem do desejo de conhecer com vistas a fazer algo de maneira mais eficiente e eficaz.

#### ***1.5.1. Objetivos Gerais***

O objetivo da pesquisa é: **Elaborar um modelo de disponibilidade operacional de uma unidade geradora hidráulica considerando o sistema sujeito a inspeções periódicas, reparos programados e forçados.**

A modelagem da disponibilidade depende da modelagem da confiabilidade e da manutenibilidade do sistema.

Os modelos gerados possuem a finalidade de aproximar as teorias de Engenharia de Confiabilidade e Gestão de Ativos Físicos da prática de uma instalação de produção de energia elétrica.

### ***1.5.2. Objetivos Específicos***

Como **objetivos específicos**, citam-se

1. Identificar oportunidades para a melhoria da disponibilidade de uma unidade geradora hidráulica;
2. Estabelecer uma sistemática de análise e tratamento de dados dos sistemas informatizados utilizados pela empresa em estudo;
3. Subsidiar a etapa de Avaliação da Confiabilidade e Manutenibilidade, inserida no Plano Mestre de Atividades do Pilar Manutenção Planejada, relativo à Metodologia TPM – Manutenção Produtiva Total;
4. Estabelecer métodos para a aferição da efetividade das políticas de manutenção;
5. Subsidiar especificações técnicas de novos equipamentos com base em medidas de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade;
6. Obter uma sistemática de previsão de custos de manutenção.

## **2. Metodologia**

### ***2.1 Tipologia da pesquisa***

De acordo com Gil (2008), qualquer classificação de pesquisa deve seguir algum critério. Se utilizarmos o objetivo geral como critério, teremos três grupos de pesquisa:

1. Pesquisas Exploratórias
2. Pesquisas Descritivas
3. Pesquisas Explicativas

Assim, ao iniciarmos qualquer pesquisa, deveremos primeiro saber qual é o objetivo desta pesquisa.

De acordo com esse objetivo, poderemos ter uma pesquisa exploratória, uma pesquisa descritiva ou uma pesquisa explicativa.

Conforme os objetivos descritos anteriormente, este trabalho caracteriza uma Pesquisa Exploratória com orientação quantitativa.

#### ***2.1.1. Pesquisa Exploratória***

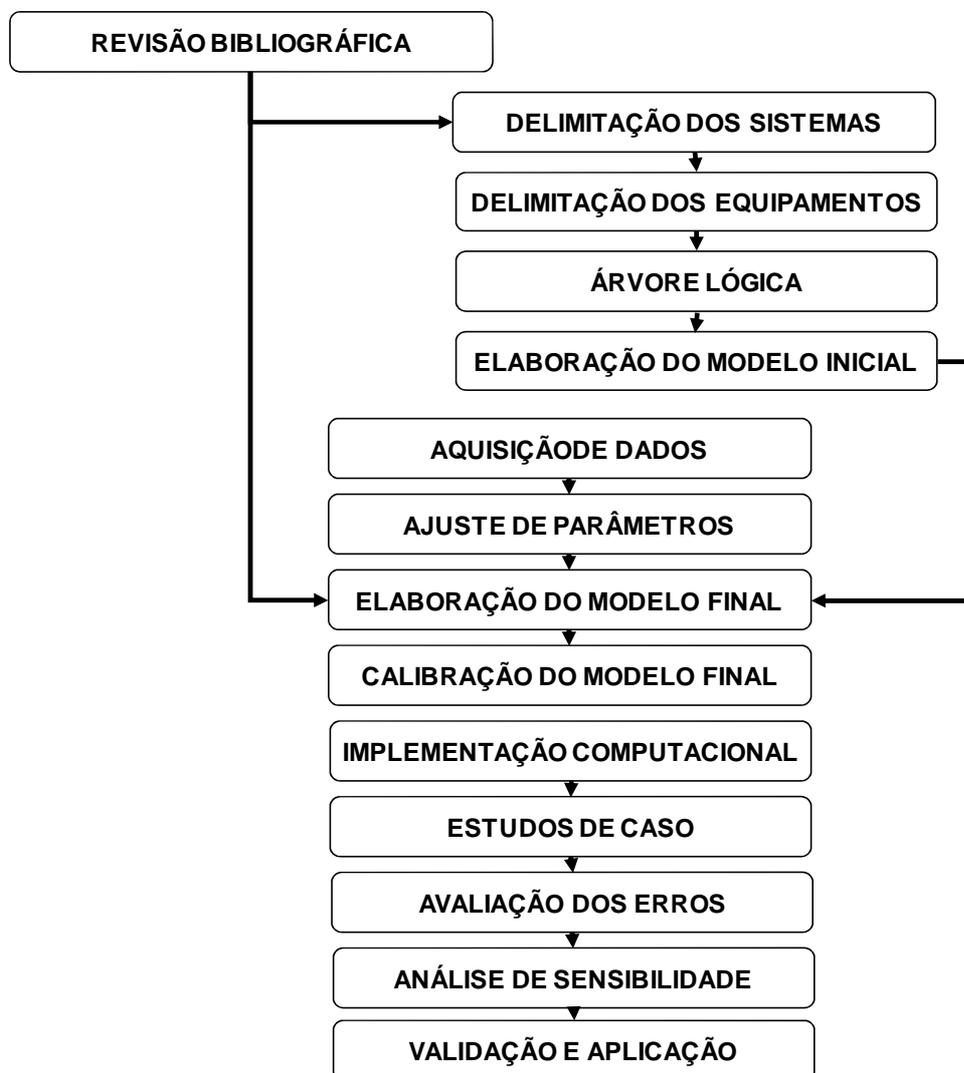
O objetivo de uma pesquisa exploratória é familiarizar-se com um assunto ainda pouco conhecido, pouco explorado. Ao final de uma pesquisa exploratória, você conhecerá mais sobre aquele assunto e estará apto a construir hipóteses. Como qualquer exploração, a pesquisa exploratória depende da intuição do explorador (neste caso, da intuição do pesquisador).

Por ser um tipo de pesquisa muito específica, quase sempre ela assume a forma de um estudo de caso (GIL, 2008).

Como qualquer pesquisa, ela depende também de uma pesquisa bibliográfica, pois mesmo que existam poucas referências sobre o assunto pesquisado, nenhuma pesquisa hoje começa totalmente do zero. Haverá sempre alguma obra, ou entrevista com pessoas que tiveram experiências práticas com problemas semelhantes ou análise de exemplos análogos que podem estimular a compreensão.

## 2.2 Delineamento da pesquisa

É apresentado abaixo o delineamento da pesquisa:



**Figura 1 - Delineamento da Pesquisa**

A revisão bibliográfica deve apoiar a definição unificada de nomenclaturas para as grandezas estudadas na pesquisa. Deve-se buscar uma convergência entre as definições da literatura e os Procedimentos de Rede do ONS, onde não se espera perda de generalidade.

## ***2.3 Procedimentos da pesquisa***

### ***2.3.1. Revisão bibliográfica***

A revisão abrangerá obras nas línguas portuguesa e inglesa, abrangendo dissertações, teses, artigos, livros e apresentações disponibilizadas na internet, além de versões impressas, como periódicos, livros nacionais e notas de aulas.

Segundo Fogliatto (2009), a área do conhecimento denominada Engenharia de Confiabilidade, no Brasil, possui sua caracterização vinculada à Engenharia de Produção, a qual evoluiu da Engenharia Mecânica aplicada, inserida no contexto da Engenharia da Qualidade, estando sua normatização referida à Área de Gestão da Qualidade.

Outra área que toma *status* de área do conhecimento evoluída da Engenharia Mecânica aplicada é a Engenharia de Manutenção, que hoje ainda não possui o nível de disseminação da Engenharia de Produção, mas que juntas desencadeiam uma revolução silenciosa nos centros acadêmicos.

Neste contexto a Engenharia de Confiabilidade ascende como indutora de qualidade nos sistemas produtivos e como ferramenta de apoio ao gerenciamento e controle da manutenção de tais sistemas.

Como literatura da área de concentração existem livros generalistas internacionais que reúnem as bases sobre o assunto e alguns livros nacionais de Engenharia de Manutenção que tratam sobre o assunto como *Confiabilidade e Manutenção Industrial* (Fogliatto, 2009) e *Confiabilidade aplicada na Manutenção* (Seixas, 2004).

Quando vinculada a área estratégica de uma organização a Engenharia de Confiabilidade apóia a consolidação do processo de Gestão dos Ativos Físicos, o qual visa melhorar o desempenho empresarial por meio da racionalização de todo o ciclo de vida dos ativos, desde as etapas de projeto até o descarte para substituição. (KARDEC, 2009)

Discussões sobre a Gestão dos Ativos Físicos fizeram com que se buscasse uma normatização que unificasse os procedimentos e nivelasse a linguagem empregada.

Deste processo foi concebida e, então, editada a PAS-55 (*Publicly Available Specification*) pela BSI - *British Standards Institution* com esta finalidade e este processo deverá ascender ao *status* de norma ISO série 55.000.

Os *handbooks* disponíveis sobre o tema possuem grande abrangência, sendo uns mais focados em Confiabilidade de Produtos e outros em Confiabilidade de Sistemas.

No estudo da Confiabilidade de Sistemas se faz necessária a diferenciação entre os Sistemas Reparáveis e Não-reparáveis. O foco deste trabalho será a revisão bibliográfica referente à Análise de Disponibilidade de Sistemas Reparáveis.

Para a Modelagem de Sistemas Reparáveis são necessários conhecimentos de Estatística, Probabilidade, Processos Estocásticos, Análise de Dados de Vida e Sobrevivência, Regressão e Ajuste de Dados, além de habilidades de programação computacional para a implementação e testes dos métodos abordados.

Para a formalização dos resultados esperados deverá ser elaborada uma revisão bibliográfica dos conceitos relativos à Probabilidade e Estatística.

A teoria da probabilidade embasará as deduções da lógica booleana necessárias a algumas técnicas e a teoria da estatística apresentará as principais distribuições de densidade de probabilidade utilizadas na prática para a modelagem de determinadas famílias de sistemas, equipamentos e componentes.

### ***2.3.2. Delimitação dos sistemas e equipamentos***

A análise dos registros de indisponibilidades (programadas ou forçadas) é uma etapa fundamental para a gestão eficiente de um empreendimento industrial e frequentemente se restringe a etapas superficiais de análise.

De acordo com a teoria clássica de gestão de processos, os registros nos sistemas informatizados são organizados de forma que possam ser utilizados nos cálculos de medidas (ou métricas) que ilustram o desempenho de determinado processo, também chamados de Indicadores de Desempenho.

No universo dos indicadores de desempenho, existem algumas recomendações a respeito da facilidade de cálculo, abrangência, pertinência e legibilidade.

As recomendações citadas facilitam a vida dos gestores, auxiliando ações de controle mais ágeis e seguras.

Ao se deparar com o universo da gestão, os modelos de mensuração e simulação de desempenho tornam-se mais simples e mais generalistas, não abrindo espaço para o aprofundamento teórico do comportamento de determinadas grandezas.

Apesar dos avanços na integração de processos empresariais pelos ERP, algumas lacunas residem para a avaliação de métricas de desempenho, principalmente no universo da Engenharia de Manutenção e Engenharia de Confiabilidade.

Em se tratando de Sistemas Reparáveis, o que se pressupõe que os sistemas já estão em operação normal (após as fases de comissionamento e operação inicial), alguns ERP não possuem a funcionalidade de cálculo de grandezas de desempenho e verificação de tendências.

Tais lacunas são preenchidas pelo cálculo manual realizado através da extração dos dados de interesse em planilhas eletrônicas previamente preparadas.

Apesar dos resultados serem os mesmos, para a mesma metodologia, na segunda forma existe o contato humano no processamento dos cálculos, o que invariavelmente poderá induzir a erro.

Mesmos os ERP que possuem internamente as sistemáticas de cálculo de indicadores de desempenho, o fazem apenas de forma superficial, calculando somente as médias do tempo de reparo e tempo entre falhas.

A média é uma medida fundamental para a análise de uma massa de dados, pois indica a tendência central de certa variável. É importante ressaltar que mesmo de fundamental importância, a média por si só não é suficiente para o controle dos processos produtivos e de manutenção.

Além das médias, são necessárias medidas de dispersão dos dados analisados e medidas que indiquem tendências. A dispersão é importante para a verificação do nível de controle sobre os eventos que causam indisponibilidades. A verificação de tendências é importante para que se possa prever de forma mais adequada o desempenho futuro dos processos analisados.

A previsibilidade do desempenho de sistemas é fundamental para o contexto do planejamento adequado das intervenções de manutenção programadas. Somente com previsões com níveis controlados de incerteza é possível estabelecer um planejamento de manutenção que atenda às metas estabelecidas para o nível tático do planejamento estratégico da organização.

### 2.3.3. *Elaboração da Árvore Lógica*

A relação lógica entre os equipamentos e sistemas foi levantada e registrada no formato de árvore, com a finalidade de permitir a aplicação das relações booleanas na computação das contribuições individuais de cada ramo no resultado final.

O modelo proposto seguiu tal diagramação lógica sobre a relação funcional dos equipamentos e sistemas.

As formas mais utilizadas para se modelar a relação funcional e se obter uma cadeia lógica são os Diagramas de Blocos e as Árvores de Falha ou Sucesso. Ambos os modelos evidenciam as relações lógicas que levam às falhas, sendo portanto modelos passíveis de conversão.

O processo de elaboração da Árvore Lógica se mostrou análogo à construção do Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) do sistema sendo a Árvore de Sucesso a versão convertida de forma direta do RBD.

As análises foram inseridas em um *software* (jMyNHPP) o qual fornece os parâmetros de desempenho para cada evento terminal, no caso de Árvores de Sucesso, ou bloco, para Diagrama de Blocos.

### 2.3.4. *Elaboração do Modelo Inicial*

O modelo proposto é inserido no contexto de uma série de áreas do conhecimento, segundo Walpole *et al* (2009), experimentos que geram valores numéricos da variável aleatória  $X$ , o número de resultados que ocorrem durante um dado intervalo de tempo ou em um região específica, são chamados de *experimentos de Poisson*. O intervalo de tempo dado pode ter qualquer extensão, tal como um minuto, um dia, uma semana, um mês ou até mesmo, um ano.

A distribuição de probabilidade da variável aleatória de Poisson  $X$ , que representa o número de resultados que ocorrem em certo intervalo de tempo ou em uma região específica denotados por  $t$ , é

$$p(x; \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!} \quad (1)$$

Onde  $x = 0, 1, 2, \dots$

A generalização da fórmula para a distribuição de Poisson é

$$P(r; \lambda t) = \sum_{x=0}^r p(x; \lambda t) \quad (2)$$

Para o processo de Poisson, tanto a média quanto a variância da distribuição são iguais a  $\lambda t$ .

#### Propriedades do processo de Poisson

1. O número de resultados que ocorrem em um intervalo de tempo ou em uma região específica é independente do número de resultados que ocorre em outro intervalo de tempo disjuncto ou região do espaço disjuncta. Nesse, caso, dizemos que o processo de Poisson não tem memória;
2. A probabilidade de que um único resultado ocorrerá durante um breve intervalo de tempo ou em uma região pequena é proporcional à extensão do intervalo de tempo ou dessa região e não depende do número de resultados que ocorrem fora desse intervalo de tempo ou dessa região;
3. A probabilidade de que mais de um resultado ocorra em um intervalo de tempo muito breve ou em uma região muito pequena é desprezível.

O Processo de Poisson é um modelo utilizado para simular processos alternantes, que possuem valores de saída binários, a qual alterna entre os estados de processo em funcionamento normal e processo no estado falho. O processo original de Poisson, como apresentado, foi generalizado, sendo criados 02 processos distintos: O Processo Homogêneo de Poisson e o Processo Não-homogêneo de Poisson.

A diferença entre os processos reside na variação da taxa de entrada, sendo esta taxa constante para o processo homogêneo e variável para o processo não-homogêneo.

Conforme Yáñez *et al* (2002), a equação do Processo Não-homogêneo de Poisson pode ser descrita com a seguinte formulação da média do número de falhas no intervalo  $[t_1, t_2]$ :

$$\bar{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad (3)$$

Onde  $\lambda(t)$  é a taxa de ocorrência de falhas (TOF ou ROCOF).

A probabilidade de ocorrência de  $n$  falhas no intervalo  $[t_1, t_2]$  é dada pela equação:

$$\Pr(N(t_2) - N(t_1) = n) = \frac{\left( \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right)^n \exp\left( - \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right)}{n!} \quad (4)$$

O total acumulado de falhas é dado pela equação:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (5)$$

Segundo Modarres *et al* (1999), um dos modelos mais utilizados em análise de confiabilidade de sistemas reparáveis é a Lei de Potência, ou Distribuição Condicional de Weibull, dada pela equação:

$$\lambda(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (6)$$

A função de confiabilidade do sistema reparável para um dado  $\lambda$  inicial no intervalo de  $[t, t+t_1]$  é dada pela equação:

$$R(t, t+t_1) = e^{-\lambda(t+t_1)^\beta - \lambda t^\beta} \quad (7)$$

### 2.3.5. Aquisição de Dados e Ajuste de Parâmetros

Os dados referentes ao processo Operar estão registrados no Sistema Info OPR, o qual é um sistema proprietário desenvolvido internamente a organização. O sistema foi concebido no modelo cliente e servidor, sendo seus dados gravados em um servidor local.

A pesquisa dos dados é realizada por uma interface dedicada, onde são entrados os parâmetros de pesquisa, como:

- a) Período – Datas inicial e final que compreendem o intervalo onde os dados serão obtidos
- b) Tipo de instalação – Instalações de geração térmica, hidroelétrica ou de transmissão
- c) Classe de equipamentos – Classificação de acordo com a tensão do sistema
- d) Classe de operação – Siglas que indicam o estado operacional

Os dados do processo Manter são registrados no Sistema R/3 da SAP, chamado de Sistema Informatizado de Gestão (SIG) que integra processos empresariais através de diferentes módulos.

O módulo de gerenciamento do processo de manutenção de plantas é o Módulo PM (*Plant Maintenance*) que com apoio direto do módulo de gestão de materiais e sobressalentes, chamado de Módulo MM (*Materials Management*), registra os dados das intervenções de manutenção já realizadas e as programadas para realização.

Dentro do Módulo PM, registram-se os dados de serviço através de 02 formulários virtuais padronizados, as Ordens de Serviço e Notas.

Foi estabelecida uma correlação entre os diferentes tipos de Notas e Ordens de Serviço durante a parametrização do Módulo PM.

As Ordens de Serviço contém os dados referentes aos custos envolvidos, o registro do planejamento do serviço, os recursos de mão-de-obra, os campos de tramitação com o despacho de carga (Centros de Operação e ONS) e os campos de controle das etapas do serviço.

Os campos de interesse nas Ordens de Serviço, para todos os tipos, são descritos a seguir:

- a) Data de início
- b) Hora do início
- c) Data de término
- d) Hora do término
- e) Tipo de serviço
- f) Tipo de atividade
- g) Prioridade
- h) Equipe responsável
- i) Custos totais planejados
- j) Custos totais reais
- k) Total de homens.hora utilizados
- l) Número da Ordem de Serviço

As Notas contêm as informações técnicas detalhadas sobre o serviço executado. Para cada tipo de manutenção um formulário diferente é disponibilizado aos executantes dos serviços.

Os diferentes tipos de manutenção produzem diferentes tipos de informações.

Os campos de interesse nas Notas de Plano de Manutenção, que geram as Manutenções Programadas, são:

- a) Nome do Local de Instalação
- b) Nome do Equipamento
- c) Abertura de Nota EA
- d) Situação do serviço
- e) Descrição da Nota
- f) Número da Nota

Os campos de interesse nas Notas de Eliminação de Anomalias, que geram as Manutenções Forçadas, são:

- a) Descrição da Nota
- b) Descrição da Situação
- c) Nome do Local de Instalação
- d) Nome do Equipamento
- e) Tipo de Anormalidade
- f) Sistema
- g) Componente
- h) Bloqueio da Causa Fundamental
- i) Número da Nota

Outros tipos de Notas serão analisados e serão incluídas na análise de acordo com a classificação da indisponibilidade causada no processo produtivo.

A filtragem dos dados é especialmente importante para a correta demonstração dos resultados do estudo, é importante que os documentos cancelados ou não realizados sejam eliminados do universo dos dados a serem analisados.

A classificação dos dados será estabelecida pelos campos de interesse de cada tipo de registro dos eventos que de certa forma impactam na disponibilidade operacional dos sistemas.

Para o caso dos registros do processo Operar serão criados campos auxiliares para uma classificação mais coerente e completa dos dados, para o processo Manter deverão ser

utilizados os campos listados, podendo sofrer a inclusão de campos auxiliares de agrupamento de períodos.

O agrupamento dos dados é uma etapa fundamental para as etapas posteriores do estudo.

### ***2.3.6. Elaboração, calibração e implementação do Modelo Final***

Cada ferramenta de análise RAM – *Reliability, Availability & Maintainability* possui lacunas que dificultam uma análise mais generalista. A integração de ferramentas, por meio de métodos e manipulações da Teoria da Probabilidade, possibilita a utilização das principais vantagens de cada técnica.

As características complementares serão expostas no texto evitando-se o aprofundamento nos desenvolvimentos de expressões matemáticas.

As principais técnicas a serem integradas são: Árvore de Sucesso (Diagrama de Blocos), Análise de Markov e Modelo de Crescimento da Confiabilidade.

A implementação de software para a automatização dos cálculos e facilidade de construção das árvores lógicas se mostra necessária, motivo pelo qual se optou por desenvolver o Sistema A<sup>2</sup> – *Availability Analysis*.

### ***2.3.7. Estudos de Caso***

O *software* implementado foi aplicado para um conjunto de diferentes tipo de caso para demonstrar a versatilidade do modelo gerado.

Foram realizados 02 (dois) Estudos de Caso, o primeiro contemplando o estudo de um sistema isolado submetido à diferentes cenários no que se refere a sua topologia e métodos de manutenção planejada.

O segundo estudo se refere ao modelo geral dos principais componentes de uma unidade geradora hidráulica, demonstrando a aplicação e desempenho do modelo para o caso de um elevado número de variáveis.

### ***2.3.8. Análise de Sensibilidade e Avaliação de Erros***

Após a aplicação do modelo no segundo estudo de caso foi inserida uma variação no modelo gerando um cenário alternativo ao estudado inicialmente.

Os desvios nos indicadores de desempenhos foram avaliados e comparados à situação inicial, evidenciando a contribuição das variáveis alteradas no resultado final.

### 3. Referencial teórico

#### 3.1 Avaliação do Desempenho de Sistemas

Conforme Lindstaedt (2012), avaliar é pronunciar-se sobre as características de certo sistema. Dado um sistema real qualquer, uma avaliação deste sistema pode ser caracterizada por toda e qualquer observação sobre ele expressada. Podem-se distinguir dois tipos básicos de avaliações:

- Avaliação qualitativa: neste tipo de abordagem existe a necessidade de uma comparação com o senso-comum, ou ainda uma comparação com um referencial de base.
- Avaliação quantitativa: baseia-se na formulação de valores específicos, sem expressar considerações dos méritos dos valores obtidos.

A princípio, toda avaliação tem por objetivo o estabelecimento de um julgamento qualitativo sobre o sistema avaliado. No entanto, toda avaliação científica é feita sobre resultados quantitativos e deve ser, tanto quanto possível objetiva, deixando para o usuário final da avaliação, o julgamento do sistema avaliado.

A aplicação prática da avaliação de desempenho é o conhecimento da situação (estado) do sistema avaliado. Tanto situações anteriores como situações atuais podem ser avaliadas para tornar possível a observação da evolução do sistema. Além disso, a observação do comportamento do sistema ajuda a entender o funcionamento do mesmo. Podem ser ainda avaliadas situações futuras, com a finalidade de previsão e planejamento.

Ainda dentro do contexto de avaliação de sistemas, cabe salientar que é sempre recomendável um estudo da confiabilidade do método; para este fim é frequente realizar-se a comparação de resultados de diversos métodos diferentes.

Tão importante quanto a avaliação é a interpretação dos resultados obtidos. Os resultados são eminentemente quantitativos enquanto que o objetivo da avaliação tem caráter qualitativo.

Em geral, bem mais importante do que o valor absoluto de um parâmetro é o seu comportamento de acordo com as variações do sistema, ou seja, a sua variação segundo alterações no modelo (ou a sensibilidade aos dados de entrada, por exemplo).

Basicamente existem 2 tipos de métodos de avaliação de desempenho: os métodos elementares e os métodos indiretos.

#### **a) Métodos Elementares**

Avaliam diretamente a realidade através de instrumentos físicos, por exemplo, com maior ou menor grau de refinamento.

Principal desvantagem: não podem ser aplicados em previsões, pois necessitam da realidade, ou pelo menos um protótipo para avaliar. Além disso, às vezes a medição direta da realidade, apesar de ser a maneira mais simples de avaliar, pode ser muito complicada ou mesmo impossível. Exemplos: medir a temperatura no interior de um reator nuclear, medir a velocidade dos ventos no interior de um tornado, etc.

#### **b) Métodos Indiretos**

Avaliam uma descrição da realidade, um modelo. O método de avaliação é aplicado sobre o modelo e todos os resultados obtidos serão função deste modelo.

Principal desvantagem: a falta de precisão que está ligada a construção do modelo, pois a qualidade destes métodos depende da qualidade do modelo desenvolvido e da qualidade da medição.

Um modelo não representa completamente a realidade. A lacuna semântica sempre permanece (distância entre o significado real e o significado da representação do real).

O processo de modelagem baseia-se na abstração. Esta se dá em duas etapas: primeiro são identificadas as características mais importantes (para aquele que modela) da realidade em questão e em seguida (segunda etapa) é feito o mapeamento desta realidade para o modelo que irá ser avaliado.

Os métodos indiretos dividem-se em:

- Simulação: são semelhantes aos métodos elementares, pois a avaliação baseia-se na observação do funcionamento do modelo. A grande vantagem da simulação é a nível de facilidade na medição, por exemplo, embora o modelo não considere a totalidade dos aspectos da realidade. Este método indireto possui normalmente um baixo nível de abstração.
- Métodos analíticos: a partir de um modelo definido segundo algumas hipóteses de funcionamento, um conjunto de equações é obtido. Tais equações são a

expressão matemática do modelo. Os métodos analíticos possuem o mais alto nível de abstração. Sua principal desvantagem deve-se ao fato de que geralmente suas hipóteses de funcionamento costumam ser restritivas demais e a elaboração do modelo tende a ser mais complexa do que em relação ao método anterior (simulação).

Cada método possui suas características próprias. Evidentemente para cada caso real a analisar, os diversos métodos serão mais ou menos adequados. É possível estabelecer uma comparação genérica entre os métodos:

**Tabela 1 – Tipos de Métodos Indiretos de Modelagem**

<b>Método</b>	<b>Objeto avaliado</b>	<b>Nível de abstração</b>	<b>Velocidade de avaliação</b>	<b>Fator de dependência</b>	<b>Precisão dos resultados</b>
Elementar	Realidade	Nenhum	Real	Tempo de observação	Real
Simulação	Modelo funcional	Baixo	Baixa	Tempo de simulação	Alta
Analítico	Modelo comportamental	Alto	Alta	Complexidade algorítmica	Exata

Adaptado de LINDSTAEDT, 2012.

### **3.2 Definições**

As definições aqui apresentadas foram extraídas dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) e das Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

#### **3.2.1. Manutenibilidade**

Segundo a NBR-5462 de 1994 da ABNT, o termo Manutenibilidade significa:

Capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.

Nota: O termo “manutenibilidade” é usado como uma medida do desempenho de manutenibilidade.

### **3.2.2. Confiabilidade**

Segundo a NBR-5462, o termo Confiabilidade significa:

Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Nota: O termo “confiabilidade” é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade.

### **3.2.3. Disponibilidade**

Segundo a NBR-5462, o termo Disponibilidade significa:

Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

Nota: O termo “disponibilidade” é usado como uma medida do desempenho de disponibilidade.

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 20.1, a disponibilidade é a porção ou porcentagem do tempo em que os equipamentos componentes da função estiveram em operação ou aptos a operar durante o período de observação, com ou sem restrições.

### **3.2.4. Manutenção**

Segundo a NBR-5462, o termo Manutenção significa:

Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

Nota: A manutenção pode incluir uma modificação do item.

### **3.2.5. Falha**

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) a falha é efeito ou consequência de ocorrência em equipamento ou linha de transmissão, de caráter acidental, que acarrete sua indisponibilidade operativa em condições não programadas, e que por isso impeça o equipamento ou a linha de transmissão de desempenhar suas funções em caráter permanente ou temporário;

### ***3.2.6. Desligamento Forçado***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) o desligamento forçado é o ato de retirar de serviço um equipamento ou linha de transmissão, em condições não programadas, resultante de falha ou de interrupção de emergência. O desligamento forçado impõe que o equipamento ou a linha de transmissão seja desligado automática ou manualmente para evitar riscos à integridade física de pessoas ou do meio ambiente, danos ao equipamento, à linha de transmissão e/ou outras conseqüências para o sistema elétrico.

### ***3.2.7. Desligamento Programado***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 20.1, o desligamento de geradores, linhas de transmissão ou demais equipamentos do sistema elétrico, programado em conformidade com o estabelecido nos Procedimentos de Rede.

### ***3.2.8. Manutenção Programada***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) a manutenção programada é a manutenção executada em equipamento ou linha de transmissão para cumprir o programa de manutenção preditiva, preventiva ou corretiva ou para atender a manutenção de urgência, em conformidade com os prazos estabelecidos no Submódulo 6.5 – Programação de intervenções em instalações da rede de operação.

### ***3.2.9. Manutenção Forçada***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) a manutenção forçada é a manutenção executada em equipamento ou linha de transmissão quando houve desligamento forçado. A manutenção forçada tem o objetivo de restabelecer a condição satisfatória de operação do equipamento ou linha de transmissão

### ***3.2.10. Manutenção Preventiva***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) a manutenção preventiva é a manutenção programada para controlar, conservar e restaurar um equipamento ou linha de transmissão, para que sejam

mantidas suas condições satisfatórias de operação e, assim, prevenir ocorrências que acarretem a sua indisponibilidade.

Observação: Nesta definição ressalta-se a palavra “prevenir”, que induz a idéia de antecipação à condições desfavoráveis.

### ***3.2.11. Manutenção Corretiva***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) a manutenção corretiva é a manutenção, programada ou não, realizada em equipamento ou linha de transmissão na qual se corrigem falhas ou defeitos, para que seja restabelecida a condição satisfatória de operação.

### ***3.2.12. Manutenção Emergencial***

Segundo o Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 16.1 (Acompanhamento de Manutenção: Visão Geral) a manutenção de emergência é a manutenção executada para correção de falha em equipamento ou linha de transmissão decorrente de uma intervenção de emergência. Deve ser executada de imediato para sanar as causas de um desligamento manual bem como seus efeitos, evitando, assim, riscos para a integridade física de pessoas, para o SIN ou para o meio ambiente, e danos em equipamentos ou linhas de transmissão.

## ***3.3 Indicadores de Processo***

Existem indicadores específicos do processo “Manter” que convergem para o resultado expresso pelos indicadores de disponibilidade.

Tais indicadores são definidos de acordo com o Submódulo 25.8 do ONS, diferentemente do período de agregação dos indicadores de resultados que é de 60 meses, os indicadores de processo possuem um período de agregação de 12 meses.

### ***3.3.1. Taxa de Falhas***

A Taxa de Falhas (*TF*) expressa a incidência de falhas nas horas de serviço de um equipamento ou de unidades pertencentes a um mesmo conjunto, no período considerado, referido a um ano padrão de 8760 horas.

$$TF = \frac{\sum_{i=1}^n (NF_i)}{\sum_{i=1}^n (HX_i)} 8760 \quad (8)$$

Onde:

$NF_i$  – Número de falhas da unidade geradora  $i$ , nos últimos 12 meses.

$HX_i$  – Número de Horas de serviço da unidade geradora  $i$ , nos últimos 12 meses.

$n$  – Número total de equipamentos.

8760 – Fator de anualização.

### 3.3.2. Tempo Médio entre Falhas

O Tempo Médio entre Falhas ( $TMEF$ ) representa o tempo médio entre a ocorrência de uma falha até a ocorrência de outra em um determinado período.

$$TMEF = \frac{\sum_{i=1}^n (HS_i)}{\sum_{i=1}^n (NF_i)} \quad (9)$$

Onde:

$HS_i$  – Horas de serviço de unidade geradora  $i$ , nos últimos 12 meses.

$NF_i$  – Número de falhas da unidade geradora  $i$ , nos últimos 12 meses.

$n$  – Número total de equipamentos.

Este indicador é conhecido internacionalmente como  $MTBF$  – *Mean Time Between Failures*.

### 3.3.3. Tempo Médio de Reparo

O Tempo Médio de Reparo ( $TMDR$ ) é o tempo médio, em horas, gasto pela manutenção para restabelecer a função exercida pelo equipamento ou instalação no sistema por meio de reparo ou de substituição do equipamento ou instalação.

$$TMDR = \frac{\sum_{i=1}^n (HIR_i)}{\sum_{i=1}^n (NDF_i)} \quad (10)$$

Onde:

$HIR_i$  – Número de horas em que a função ficou indisponível para operação e entregue à manutenção forçada, devido ao evento  $i$ ;

$NDF_i$  – Número de desligamentos forçados do equipamento ou da instalação  $i$ .

Os indicadores aqui apresentados e seus constituintes descrevem os principais indicadores de processo, ou ação (*KAI*), constantes dos Procedimentos de Rede do ONS.

Este indicador é conhecido internacionalmente como *MTTR – Mean Time To Repair*.

### **3.4 Indicadores de Resultados**

#### **3.4.1. Perspectiva do Cliente versus a do Fornecedor**

Segundo Dhillon (2002), no contexto das plantas industriais as estruturas organizacionais das áreas de Produção e Manutenção são caracterizados os papéis de Clientes e Fornecedores de Serviços, respectivamente.

A Manutenção se coloca como fornecedora de serviços ao Cliente Interno da empresa à Produção criando uma condição de subordinação ao atendimento dos requisitos de satisfação de seus clientes.

Uma série de análises pode ser realizada sob esta ótica, porém neste trabalho abordaremos apenas a questão da satisfação ao requisito Disponibilidade.

Para a Produção, quanto mais tempo as máquinas estiverem disponíveis para produzir, maior será a confiança no atendimento das metas de produção estabelecidas, condicionadas à demanda.

A decisão sobre intervenções de manutenção de forma forçada ou programada, normalmente é da Manutenção, a qual além de comprometida com as metas de produção defende metas de durabilidade dos ativos sob sua responsabilidade.

Nesta situação é natural inferir que as políticas de reparo mínimo (PHAN *et al.*, 2003) são as que melhor se encaixam no atendimento aos requisitos dos Clientes, desde que exista a percepção da ausência de condições de deterioração dos equipamentos.

Percebe-se neste ponto a tendência de se manter uma taxa de desligamentos forçados e programados (não preventivos) a níveis elevados, pois é preferível o rápido restabelecimento

do equipamento com problema, desde que se retome a produção, a manter uma política de Desligamentos Preventivos que a cada desligamento sejam abordadas partes do sistema que não estejam criticamente comprometidos.

### 3.4.2. Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada

A Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada (*TEIP*) expressa a relação das horas de desligamento programado e das horas equivalentes de desligamento programado (entende-se que a unidade opera com potência nominal limitada associada a uma condição programada) com o total de horas no período de apuração.

$$TEIP_{mensal} = \frac{HDP + HEDP}{HP} \quad (11)$$

Onde:

*HDP* – Horas de Desligamento Programado;

*HEDP* – Horas Equivalentes de Desligamento Programado (unidade opera com potencia nominal limitada associada a uma condição programada);

*HP* – Total de Horas no período de apuração.

Da mesma forma do *TEIF*, o submódulo 25.8 do ONS prevê uma apuração mensal do indicador, o qual passará a fazer parte da série histórica da instalação que será utilizada o cálculo do Índice de Disponibilidade (*ID*), pela média dos resultados dos últimos 60 meses.

$$TEIP_{acumulado} = \frac{\sum_{i=1}^{60} TEIP_{mensal}}{60} \quad (12)$$

$$TEIP_{usina} = \frac{P_i \times \left( \frac{HDP_i + HEDP_i}{HP_i} \right)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (13)$$

### 3.4.3. Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada

A Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (*TEIFa*) expressa a relação das horas de desligamento forçado e das horas equivalentes de desligamento forçado (unidade operando com potência nominal limitada, associada a uma condição forçada) com as horas em serviço,

com as horas de reserva desligada (fora de serviço por interesse sistêmico) e com as horas de reserva desligada por razões externas (desligamentos).

$$TEIFa_{mensal} = \frac{HDF + HEDF}{HS + HDF + HRD + HDCE} \quad (14)$$

Onde:

*HDF* – Horas de Desligamento Forçado;

*HEDF* – Horas Equivalentes de desligamento Forçado (Unidade operando com potência nominal limitada, associada a uma condição forçada);

*HS* – Horas em serviço;

*HRD* – Horas de Reserva Desligada (fora de serviço por interesse sistêmico);

*HDCE* – Horas de Reserva Desligada por razões externas (desligamentos).

O submódulo 25.8 do ONS prevê uma apuração mensal do indicador, o qual passará a fazer parte da série histórica da instalação que será utilizada o cálculo do Índice de Disponibilidade (*ID*), pela média dos resultados dos últimos 60 meses.

$$TEIFa_{acumulado} = \frac{\sum_{i=1}^{60} TEIFa_{mensal}}{60} \quad (15)$$

A Resolução ANEEL 688/2003 estabelece em seu Artigo 3º, § 4º que os indicadores *TEIFa* e *TEIP* devem ser calculados por usina.

A atual agregação do cálculo referida na Rotina ONS RO-AO.BR.04 é efetuada através de média dos indicadores entre os valores apurados de cada Unidade Geradora (UG), resultando em impactos diferenciados na *TEIFa*.

$$TEIFa_{usina} = \frac{P_i \times \left( \frac{HDF_i + HEDF_i}{HS_i + HDF_i + HRD_i + HDCE_i} \right)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (16)$$

#### 3.4.4. Índice de Disponibilidade

O Índice de Disponibilidade (*ID*) expressa a disponibilidade, relacionando as taxas de equivalência de indisponibilidade forçada apurada e programada, mensalmente.

$$ID_{mensal} = (1 - TEIFa_{mensal}) \times (1 - TEIP_{mensal}) \quad (17)$$

Onde:

$TEIFa_{mensal}$  – Taxa de Equivalência de Indisponibilidade Forçada Apurada Mensal.

$TEIP_{mensal}$  – Taxa de Equivalência de Indisponibilidade Programada Mensal.

Expressa a disponibilidade verificada no período de análise, relacionando as taxas de equivalência de indisponibilidade forçada apurada e programada, nos últimos 60 meses.

$$ID_{acumulado} = (1 - TEIFa_{acumulado}) \times (1 - TEIP_{acumulado}) \quad (18)$$

Onde:

$TEIFa_{acumulado}$  – Taxa de Equivalência de Indisponibilidade Forçada Apurada acumulada em 60 meses.

$TEIP_{acumulado}$  – Taxa de Equivalência de Indisponibilidade Programada Acumulada em 60 meses.

Pela análise dos resultados das usinas hidrelétricas, disponibilizados no site do ONS ([www.ons.com.br](http://www.ons.com.br)), obtêm-se algumas métricas de comparação para evolução da disponibilidade operacional das usinas hidrelétricas.

### ***3.5 Métodos de Estimação de Parâmetros***

Segundo Fogliato (2009), se pode estimar os parâmetros (estatísticos) populacionais pelos seguintes métodos:

1. Dos momentos;
2. Dos mínimos quadrados;
3. Da máxima verossimilhança.

Independente do método utilizado deseja-se obter estimadores com as seguintes propriedades:

1. *Não tendencioso*: Estimador que não subestima ou superestima, de maneira sistemática, o valor real do parâmetro.
2. *Consistente*: Estimador não tendencioso que converge rapidamente para o valor real do parâmetro a medida que o tamanho da amostra aumenta.

3. *Eficiente*: Estimador consistente que apresenta a menos variância dentre os estimadores usados para estimar o mesmo parâmetro populacional.
4. *Suficiente*: Estimador eficiente que utiliza toda a informação acerca do parâmetro que a amostra possui.

Um dos melhores métodos para obter estimadores pontuais de parâmetros populacionais é o método da máxima verossimilhança, o qual será utilizado neste trabalho.

### ***3.6 Modelo de Crescimento da Confiabilidade***

Segundo o Departamento de Defesa dos EUA (2011), a obtenção e processamento de dados para calcular a confiabilidade e a tendência de falha de certos equipamentos tem sido um problema constante na indústria. Muitas vezes, o momento da falha é desconhecido, o modo de falha é difícil de identificar, os dados estão faltando ou simplesmente não há dados de falha suficientes. Usando o modelo de crescimento de confiabilidade *AMSAA* permite-se uma amostra de dados dita "suja", uma vez que o modelo analisa os processos, não os sistemas. O modelo permite a utilização de pequenos conjuntos de dados, conjuntos com lacunas de dados e modos de falha mistos. O modelo *Crow-AMSAA* foi desenvolvido por James T. Duane na *General Electric*. Larry H. Crow da área de Análise do Suprimento de Materiais do Exército Americano (*Army Material Systems Analysis Activity – AMSAA*) descreveu mais tarde o mesmo conceito, mas forneceu a análise estatística, estabelecendo a relação entre o modelo de *Crow-AMSAA* e a distribuição *Weibull*. Por esse motivo, o modelo *Crow-AMSAA* é por vezes referido como um Processo de *Weibull*.

A Lei de Potência (*Power Law*) é obtida pela hipótese que o número acumulado de falhas varia de acordo com o tempo. Dada pela equação:

$$N(t) = \lambda t^{\beta} \quad (19)$$

Onde:

$\lambda$  = parâmetro de escala

$\beta$  = parâmetro de forma

$t$  = instante de tempo

A taxa de ocorrência de falhas (instantânea) é dada pela diferenciação do número acumulado de falhas em função do tempo:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \beta t^{(\beta-1)} \quad (20)$$

Onde:

$\lambda$  = parâmetro de escala

$\beta$  = parâmetro de forma

$t$  = instante de tempo

Esta equação é chamada de Lei de Potência, e advém da hipótese de variação do número acumulado de falhas com o tempo, em função de um expoente chamado de parâmetro de forma.

Segundo Modarres (1999), sob certas condições de observação de um sistema simples observado até a  $n$ -ésima falha, os estimadores de máxima verossimilhança para  $\beta$  (parâmetro de forma) e  $\lambda$  (parâmetro de escala) da Lei de Potência podem ser obtidos pelas fórmulas:

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{t_n}{t_i}} \quad (21)$$

Para o parâmetro de forma  $\hat{\beta}$ , sendo:

$n$  = número de dados de falha (neste caso de desligamentos)

$t_i$  = instante da primeira falha

$t_n$  = instante da última falha; e

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{t_n^{\hat{\beta}}} \quad (22)$$

Para o parâmetro de escala  $\hat{\lambda}$ , sendo:

$n$  = número de dados de falha (neste caso de desligamentos)

$t_n$  = instante da última falha

$\hat{\beta}$  = parâmetro de forma, previamente calculado

O acento circunflexo denota que tais variáveis são estimadores, o que permite diferenciar os valores calculados das variáveis manipuladas.

O estimador do parâmetro de forma  $\hat{\beta}$  quando obtido pelo Método da Máxima Verossimilhança possui um viés que pode ser corrigido pela expressão:

$$\bar{\beta} = \frac{n-2}{n} \hat{\beta} \quad (23)$$

Sendo:

$n$  = número de dados de falha (neste caso de desligamentos);

$\hat{\beta}$  = parâmetro de forma, previamente calculado.

Observa-se que para grandes amostras os valores dos parâmetros de forma e parâmetros de forma corrigidos tendem à igualdade e que o método não será válido para amostras com  $n < 3$ . (RELIASOFT, 2010)

### ***3.7 Diagramas de Blocos de Confiabilidade***

De acordo com Fogliatto (2009), o método do Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) ou Análise de Sistemas Série-Paralelo constitui-se da elaboração grafos direcionados contendo as interligações lógicas, que impactam na análise de confiabilidade, entre entidades que formam um sistema.

Segundo Drogue (2012), uma definição de Sistema é um conjunto de itens como subsistemas, componentes, software e operadores (elemento humano), cujo funcionamento adequado e coordenado implica no funcionamento do sistema.

A análise da confiabilidade de sistemas é definida neste contexto como a avaliação das relações entre componentes e de suas confiabilidades com o objetivo de se ter uma visão generalizada da confiabilidade do sistema.

O método induz à resposta das seguintes questões:

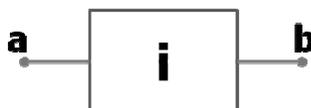
- Como as probabilidades de falha de componentes podem ser utilizadas na avaliação do desempenho do sistema?
- Qual é o impacto da arquitetura do sistema na confiabilidade do mesmo?

- Quais são os benefícios da utilização de componentes redundantes?
- Qual é o impacto de falhas de causa comum na confiabilidade do sistema?

São usados para modelar o impacto das falhas de componentes no desempenho do sistema um diagrama de blocos que reflete a relação funcional entre os componentes do sistema, sendo que cada bloco corresponde a uma função desempenhada por um componente ou conjunto de componentes para o qual dispomos de dados de confiabilidade.

Diagrama de Blocos é uma rede descrevendo a função do sistema. Se um sistema possui mais de uma função, então cada função é considerada individualmente e um diagrama de blocos distinto é estabelecido para cada função do sistema.

Cada um dos  $n$  componentes é ilustrado por um bloco:



**Figura 2 - Exemplo de bloco para composição do diagrama.**

O componente  $i$  está em operação quando existe conexão entre  $a$  e  $b$ .

Se o modo de falha representado não ocorre isto não significa que o componente  $i$  satisfaz todas as suas funções, apenas que a função representada por este bloco é satisfatoriamente desempenhada.

As diversas maneiras através das quais  $n$  componentes estão interconectados para a realização de uma determinada função do sistema podem ser ilustradas por um diagrama de blocos.

### **Sistemas em Série**

São definidos como sistemas formados por  $n$  componentes independentes, sendo que os  $n$  componentes devem funcionar simultaneamente para que o sistema funcione.

O sistema falha se qualquer um de seus componentes falha como pode ser observado pela representação gráfica. Se qualquer componente falhar não haverá conexão entre  $a$  e  $b$ .



**Figura 3 - Exemplo de diagrama para sistema em série**

Generalizando para  $n$  componentes independentes em série, a equação que quantifica a confiabilidade de todo o sistema representa a interseção das confiabilidades individuais.

$$P(E_0) = \prod_{i=1}^n P(E_i) \tag{24}$$

A confiabilidade de um sistema em série nunca é maior do que a menor confiabilidade de seus componentes constituintes.

**Tabela 2 – Exemplo de cálculo de confiabilidade para sistema em série**

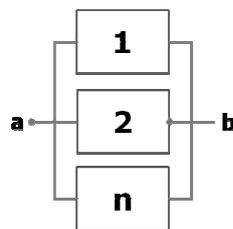
Confiabilidade do componente	Número de componentes semelhantes		
	5	20	100
0,850	44,370531%	3,875953%	0,000009%
0,900	59,049000%	12,157665%	0,002656%
0,950	77,378094%	35,848592%	0,592053%
0,999	99,500999%	98,018886%	90,479215%

**Sistemas em Paralelo**

Na arquitetura dos sistemas em paralelo todos os componentes devem falhar para que o sistema falhe. Considera-se neste caso um sistema com redundâncias ativas.

Se pelo menos um dos componentes funciona, então o sistema continua a funcionar (não falha)

Ativo significa que todos os componentes estão operando durante o período de missão do sistema.



**Figura 4 - Exemplo de diagrama de blocos de sistema em paralelo.**

Generalizando para  $n$  componentes independentes:

$$P(X_0) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(X_i)] \tag{25}$$

Note que para um sistema em paralelo ativo:

$$P(X_0) \geq \max\{P(X_1), P(X_2), \dots, P(X_n)\} \quad (26)$$

A confiabilidade de um sistema em paralelo ativo é maior ou igual à confiabilidade do seu componente mais confiável.

### **Considerações sobre o Método do Diagrama de Blocos de Confiabilidade**

O método do Diagrama de Blocos de Confiabilidade é difundido na indústria e conta com uma série de demonstrações matemáticas específicas quando se aplica a Distribuição Exponencial ou Weibull.

Para os sistemas em paralelo com compartilhamento de carga é utilizado o método de *k-de-n* para a estimação da confiabilidade. Este método aponta para as situações em que o sistema conta com *n* componentes disponíveis dos quais quaisquer combinações de *k* componentes é suficiente para atender a demanda do sistema. Este tópico não foi alvo do presente estudo.

### **3.8 *Árvore de Falhas e Árvore de Sucesso***

A técnica de análise da Árvore de Falha de um sistema é difundida na literatura, o que não é caso de sua complementar: a análise da Árvore de Sucesso.

Ambas as técnicas são sustentadas pelas relações da Lógica Booleana, residindo sua principal diferença no fato de que a Árvore de Falha busca as possíveis combinações de eventos básicos que desencadeiam o evento topo, de natureza negativa ou indesejável, enquanto a Árvore de Sucesso evidencia o caminho lógico que evidencia a realização desejável de uma função ou objetivo.

No decorrer do texto serão explicitadas relações e citações sobre a análise de Árvore de Falha que se equivalem à Análise da Árvore de Sucesso.

Segundo Firmino (2006), a técnica de análise das Árvores de Falhas (ou Sucesso) é uma das principais ferramentas empregadas em confiabilidade e análise de risco para o suporte nas tomadas de decisão e controle de gestores na busca da garantia da execução satisfatória das funções de um dado sistema e seus componentes, considerando as condições ambientais e de operação.

A análise de Árvores de Sucesso permite a obtenção das medidas de confiabilidade, referindo-se a eventos desejáveis inerentemente ligados aos sistemas. Na sua montagem, Árvores de Sucesso postulam um provável evento desejável do sistema, chamado de evento topo da árvore e representam todas as combinações de eventos causadores do mesmo, através de

regras de álgebra booleana. Entre estes eventos, têm-se não ocorrência de falhas de subsistemas ou componentes, que em um maior nível de detalhamento são representados por eventos básicos, os quais são fenômenos observáveis.

De acordo com Droggett (2012) as definições das técnicas são:

*Árvore de Falhas* é um processo dedutivo através do qual um evento indesejável chamado de *evento topo* é postulado e as possíveis formas deste evento ocorrer são sistematicamente deduzidas.

*Árvore de Sucesso* representa as diversas combinações de eventos desejáveis (sucessos) que garantem a ocorrência do evento topo.

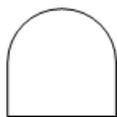
Em cada nível da árvore, os eventos de nível inferior representam as causas *imediatas*, *necessárias*, e *suficientes* para a ocorrência do evento em um nível imediatamente superior a estes, incluindo o evento topo.

Etapas na análise de sistemas por *Árvore de Sucesso*:

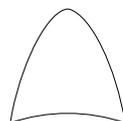
1. Defina o sistema, as suas fronteiras, e o evento topo;
2. Construa a árvore, a qual simbolicamente representa o sistema e os seus eventos relevantes à ocorrência do evento topo;
3. Realize uma análise qualitativa (avaliação lógica) das combinações de eventos que acarretam na ocorrência do evento topo;
4. Realize uma análise quantitativa (avaliação probabilística) que consiste em associar probabilidades aos eventos básicos e estimando a probabilidade do evento topo.

A seguir são apresentados os principais componentes de uma *Árvore de Sucesso*.

Portas lógicas:

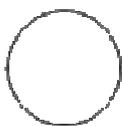


Porta lógica do tipo "E" – Aplicam-se quando o evento resultante, falha ou sucesso, depende da ocorrência de todos os eventos básicos conectados à porta lógica. Na Lógica Booleana o resultado desta porta corresponde à intersecção entre os eventos conectados.

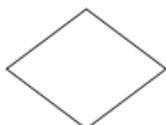


Porta lógica do tipo "OU" – Aplicam-se quando o evento resultante, falha ou sucesso, depende da ocorrência de qualquer um dos eventos básicos conectados à porta lógica. Na Lógica Booleana o resultado desta porta corresponde à união entre os eventos conectados.

Eventos:



Evento básico – Representação gráfica para a ocorrência de evento no último nível de detalhamento desejado. Para análises estáticas são atribuídas probabilidades de ocorrência e para análises dinâmicas são atribuídas distribuições paramétricas de probabilidade em função do tempo.



Evento incompleto – Evento que não é desenvolvido por falta de informação ou por ser considerado pouco relevante.



Evento intermediário – Resultado da combinação de outros eventos apresentado na saída de uma porta lógica.

A análise quantitativa da probabilidade se dá pela aplicação de métodos de resolução indutivos e dedutivos.

De acordo com Simões Filho (2006), os métodos indutivos constituem uma argumentação do específico para o geral, isto é, da causa para o efeito, enquanto os métodos dedutivos constituem uma argumentação do geral para o específico, isto é, do efeito para a causa.

Analogamente à ferramenta de Diagrama de Blocos, para conexões em paralelo, os eventos de maior nível, cuja ocorrência é regida por eventos básicos conectados a uma porta lógica OU, terão uma probabilidade de ocorrência (sucesso) de acordo com a expressão:

$$P(X_0) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(X_i)]$$

Da mesma forma, os eventos de maior nível, cuja ocorrência é regida por eventos básicos conectados a uma porta lógica E, terão uma probabilidade de ocorrência, assim como para conexões em série nos Diagramas de Blocos, de acordo com a expressão:

$$P(E_0) = \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

A combinação de expressões gera a expressão geral da probabilidade de ocorrência do evento topo nas perspectivas de falha ou sucesso do sistema.

### 3.9 Análise Markoviana

Análise Markoviana constitui-se em uma poderosa e flexível técnica de modelagem e análise amplamente empregada em análises dinâmicas de confiabilidade e disponibilidade de sistemas. O comportamento da confiabilidade de um sistema é representado usando-se um diagrama de transições entre estados, o qual consiste em um conjunto de estados discretos nos quais o sistema pode se encontrar em um determinado momento e define as taxas segundo as quais transições entre esses estados podem ocorrer. Desta forma, modelos Markovianos consistem em representações de cadeias de eventos, ou seja, transições dentro do sistema que, no contexto da análise de confiabilidade e disponibilidade, correspondem a seqüências de falhas e reparos.

O modelo de Markov é analisado com o objetivo de obter atributos de confiabilidade como a probabilidade do sistema estar em um dado estado em um determinado instante, a quantidade média de tempo que o sistema passa em um determinado estado, o número esperado de transições entre estados como, por exemplo, representando o número de falhas e reparos. (DROGUETT, 2004)

Graficamente, um modelo de Markov é tipicamente representado por meio de um conjunto de nós e setas, onde os nós representam os estados que o sistema pode ocupar e as setas correspondem às transições entre estados.

#### 3.9.1. Cadeia de Markov com 2 estados

Considerando um único componente com dois possíveis estados:

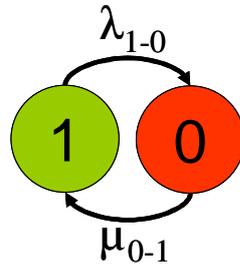
- Estado 1: o componente está disponível (em operação ou apto a operar);
- Estado 0: o componente está falho.

Uma transição do estado 1 para o estado 0 corresponde a uma falha do componente, enquanto que uma transição do estado 0 para o estado 1 significa que o componente tem sido reparado. Assim, a taxa de transição  $\lambda_{1-0}$  corresponde à taxa de falha do componente, enquanto que a taxa de transição  $\mu_{0-1}$  é a taxa de reparo do mesmo. Para simplificar a notação neste exemplo, vamos escrever:

- $\lambda_{1-0} = \lambda$  (taxa de falha)
- $\mu_{0-1} = \mu$  (taxa de reparo)

Como consequência da “falta de memória” de um processo de Markov, todos os tempos de transição são exponencialmente distribuídos, ou seja, o tempo de permanência do sistema em um determinado estado até o processo realizar uma transição para fora deste estado é distribuído de acordo com uma distribuição exponencial. Para o nosso exemplo, o tempo de reparo do componente é distribuído de acordo com uma distribuição exponencial com taxa  $\mu$ , sendo o tempo médio de reparo (MTTR) igual a  $1/\mu$ .

Diagrama de Markov para o componente:



**Figura 5 - Cadeia de Markov com 2 estados**

As equações de estado são dadas pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} -\mu & \lambda \\ \mu & -\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{P}_0(t) \\ \dot{P}_1(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Assumindo que o componente encontra-se operacional no início da missão, ou seja,  $P_0(t=0) = 0$  e  $P_1(t=0) = 1$ , a transformada de Laplace do sistema de equações de estado é:

$$\begin{bmatrix} -\mu & \lambda \\ \mu & -\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0^*(s) \\ P_1^*(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sP_0^*(s) \\ sP_1^*(s) - 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Assim,

$$-\mu P_0^*(s) + \lambda P_1^*(s) = sP_0^*(s) \quad (29)$$

$$\mu P_0^*(s) - \lambda P_1^*(s) = sP_1^*(s) - 1 \quad (30)$$

logo,

$$P_0^*(s) = \frac{1}{s} - P_1^*(s) \quad (31)$$

Substituindo a equação (31) na equação (29), obtém-se

$$P_1^*(s) = \frac{1}{\lambda + \mu + s} + \frac{\mu}{s} \cdot \frac{1}{\lambda + \mu + s}$$

Para podermos encontrar a transformada inversa de Laplace, a equação pode ser escrita na seguinte forma:

$$P_1^*(s) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{\lambda + \mu + s} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot \frac{1}{s} \quad (32)$$

Logo, a transformada inversa de Laplace da equação (30) é

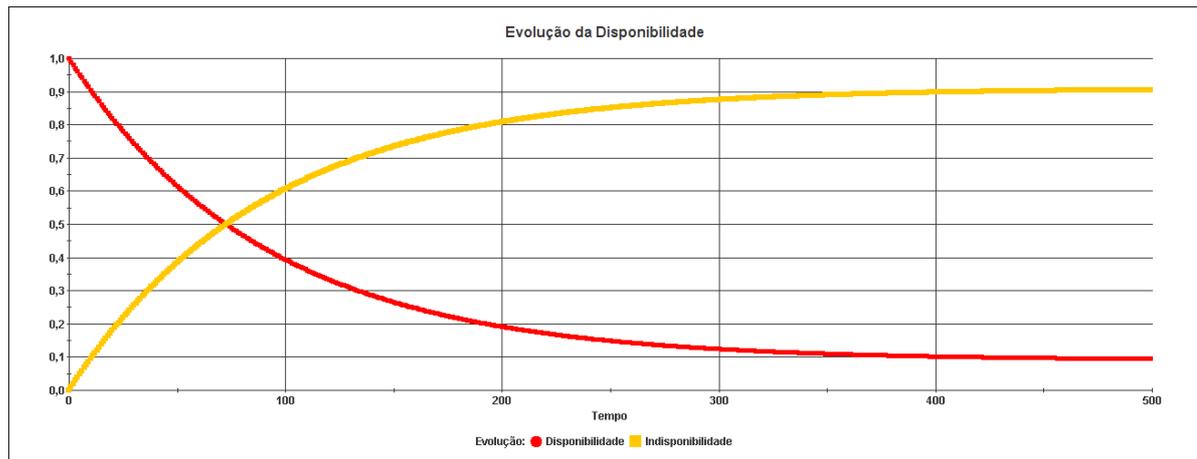
$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

Como o estado 1 corresponde ao componente em condições operacionais,  $P_1(t)$  é a probabilidade de que o componente está operacional no instante  $t$ . Dizemos, então, que a disponibilidade  $A(t)$  do componente é igual a  $P_1(t)$ .

Uma vez que  $P_0(t) = 1 - P_1(t)$ , a indisponibilidade do componente é dada por:

$$P_0(t) = -\frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (33)$$

O Gráfico 1 mostra como a disponibilidade e a indisponibilidade variam com o tempo supondo que o componente possui taxa de falha  $\lambda = 0,01$  [falha/h] e taxa de reparo  $\mu = 0,001$ [reparo/h].



**Gráfico 1 - Evolução da probabilidade dos estados 1 e 0.**

A disponibilidade assintótica é obtida tomando-se o limite da expressão  $P_1(t)$ :

$$\bar{A} = P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{34}$$

O tempo médio até falhar (MTTF) é igual a  $1/\lambda$  (lembre-se que apesar do componente ser reparável, estamos considerando o estado estacionário, ou seja, quando o tempo tende ao infinito), e o tempo médio de reparo (MTTR) é  $1/\mu$ . Assim, disponibilidade média também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\bar{A} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{35}$$

### 3.10 Método Lambda-Tau

#### 3.10.1. Introdução:

A proposta da Metodologia Lambda-Tau é calcular a confiabilidade de um sistema reparável a partir da taxas de falha  $\lambda$  (Lambda) e tempo de reparo  $\tau$  (Tau) de seus componentes. O método baseia-se no fato de que o sistema será representado através de uma Árvore de Falhas livre de eventos redundantes. (CARVALHO A. L., 2006)

Considerando um modelo em Árvore de Falhas podem ser deduzidas expressões analíticas para o cálculo da taxa de falha  $\lambda$  e do tempo de reparo  $\tau$  associadas aos operadores lógicos “OU” (componentes em série) e “E” (componentes em paralelo), a partir dos conceitos de disponibilidade e análise em espaço de estados.

Inicialmente serão derivadas expressões para o cálculo de dois componentes e posteriormente generalizadas para  $n$  componentes. Uma vez conhecidas as expressões, estas serão simplificadas segundo as hipóteses que fundamentam a Metodologia Lambda-Tau, listadas a seguir:

- A razão entre o tempo de reparo  $\tau$  e o tempo de missão  $T$  é muito pequena ( $\tau/T \leq 0.1$ )
- As taxas de falha dos eventos básicos  $\lambda_i$  são muito pequenas ( $\lambda_i \leq 10^{-3}$  [f/h])
- O produto da taxa de falha  $\lambda$  pelo tempo de reparo  $\tau$  é muito pequeno ( $\lambda \tau \leq 0.1$ )
- O produto da taxa de falha  $\lambda$  pelo tempo de missão  $T$  é muito pequeno ( $\lambda T \leq 0.1$ )
- A taxa de falha  $\lambda$  e a taxa de reparo  $\mu$  são constantes
- As falhas são estatisticamente independentes

### 3.10.2. Aplicação para Componentes em Série

Considerando-se um sistema reparável composto por  $n$  componentes em série, sua disponibilidade está condicionada ao funcionamento simultâneo de todos os componentes. O estado do sistema depende da taxa de falhas  $\lambda_i$  e da taxa de reparo  $\mu_i$  de cada componente. São representadas por  $\lambda_s$  e  $\mu_s$  as taxas de falha e reparo totais do sistema em série, respectivamente.

Taxa de Falhas do Sistema em Série:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Taxa de Reparo do Sistema em Série:

$$\mu_s = \frac{1}{\tau_s}$$

Onde o  $\tau$  representa o Tempo Médio de Reparo.

$$\tau_s = \frac{\left[ \prod_{i=1}^n (\lambda_i \tau_i + 1) \right] - 1}{\lambda_s} \quad (36)$$

Uma hipótese para simplificação da Equação 36 é supor que a probabilidade de ocorrer a transição de estado em mais de um componente, em um curto intervalo de tempo, é muito

pequena. Assim, devido a esta consideração, a Equação 36 pode ser simplificada como apresentado abaixo (CARVALHO A. L., 2006 *apud* BILLINTON, 1978):

$$\tau_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (37)$$

O tempo de reparo é, geralmente, calculado por esta expressão aproximada.

A Disponibilidade pode ser representada pela equação:

$$A_{ss} = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)} = \frac{\mu_s}{\lambda_s + \mu_s} \quad (38)$$

### 3.10.3. Aplicação para Componentes em Paralelo

Considerando-se um sistema reparável composto por  $n$  componentes em paralelo, uma falha ocorrerá somente se todos os componentes falharem. A taxa de reparo de um sistema em paralelo é a soma das taxas de reparo dos componentes conforme Equação 39.

$$\mu_p = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (39)$$

Considerando-se dois componentes em paralelo e sabendo-se que o tempo de reparo  $\tau_p$  é o inverso da taxa de reparo obtêm-se a Equação 40.

$$\tau_p = \frac{1}{\mu_p} = \frac{1}{\mu_1 + \mu_2} = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2} \quad (40)$$

A Equação 40 pode ser generalizada para  $n$  componentes em paralelo dando origem à Equação 41.

$$\tau_p = \frac{\prod_{i=1}^n \tau_i}{\sum_{j=1}^n \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \tau_i} \quad (41)$$

A Taxa de Falhas para o sistema com componentes em paralelo é dada por:

$$\lambda_p = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i \left[ \sum_{j=1}^n \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \tau_i \right]}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i \tau_i + 1) - \prod_{i=1}^n (\lambda_i \tau_i)} \quad (42)$$

A Equação genérica 42 pode ser simplificada considerando-se que o produto da taxa de falhas pela taxa de reparo é muito pequeno, de onde se obtêm:

$$\lambda_p = \prod_{i=1}^n \lambda_i \left[ \sum_{j=1}^n \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \tau_i \right] \quad (43)$$

#### 3.10.4. Considerações sobre o método

O Método Lambda-Tau possui ampla aplicação prática para sistemas produtivos que possam ser caracterizados por 02 (dois) estados: Operacional e Falho.

O método trabalha por meio da metodologia de Árvore de Falhas, o qual pode causar inconvenientes na conversão do Diagrama de Blocos do Sistema.

No contexto do Setor Elétrico Brasileiro, o qual estabelece indicadores de Manutenção Programada, o método se mostra pouco aderente para representar adequadamente todos os estados possíveis de ativos sob responsabilidade de Agentes atuando neste setor.

Como requisito para a aplicação deste método, as Taxas de Falha e de Reparo de vem ser, obrigatoriamente, constantes, para que as equações analíticas apresentadas possam ser aplicadas.

O método se mostra aplicável a avaliações do desempenho dos sistemas em estado estacionário, de longo prazo, não evidenciando a evolução no tempo para algumas das principais grandezas de interesse.

A modelagem proposta nas próximas seções busca cobrir as lacunas presentes no Método Lambda-Tau.

#### 4. Modelagem Proposta

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas utilizadas na modelagem do sistema reparável estudado.

A modelagem proposta consiste do acoplamento de 03 (três) técnicas amplamente utilizadas na indústria, que integradas resultam uma forma robusta e flexível de modelagem de sistemas.

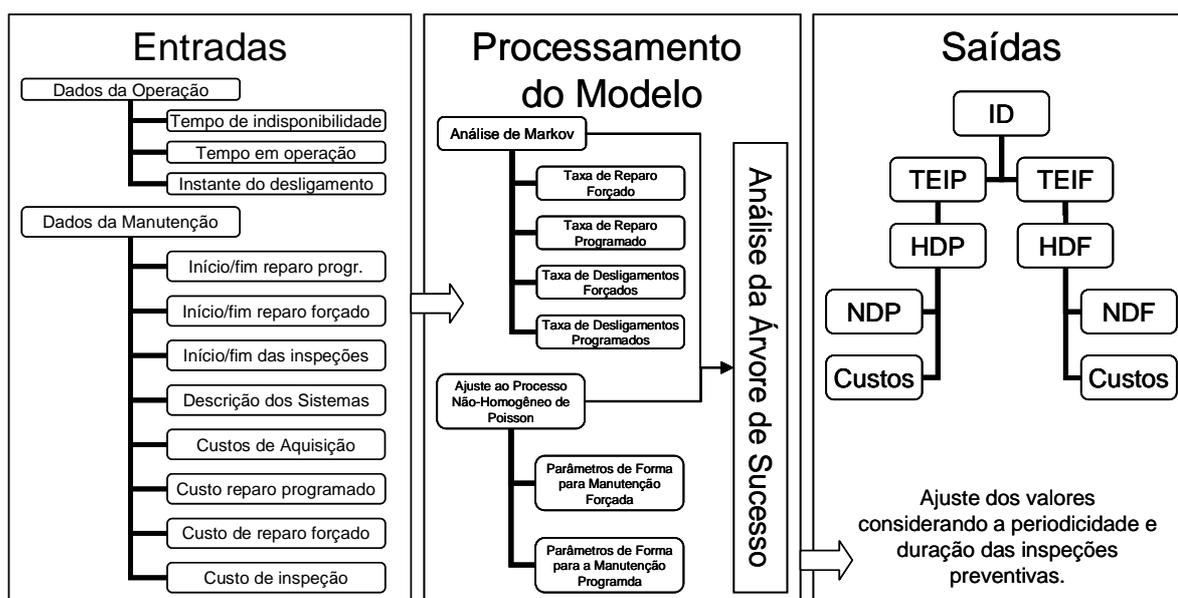


Figura 6 - Fluxo de Informações do Modelo

##### 4.1 Análise Dinâmica da Árvore de Sucesso do Sistema

A teoria das Árvores de Falha e Sucesso quando apresentada na literatura aponta para uma análise pontual da probabilidade do evento topo. Entende-se que aplicando um valor de probabilidade a cada evento básico a lógica booleana resultará um valor único de probabilidade.

Porém, se atribuirmos uma distribuição de probabilidade qualquer, em função do tempo, para cada evento básico e definirmos um número de pontos desejados, pode se gerar um gráfico da probabilidade do evento topo em função do tempo, avaliando a equação lógica para instantes de tempo ( $t_i$ ) determinados, o que em certas situações é mais conveniente que a análise pontual.

Analogamente à Análise de Árvore de Sucesso convencional, os eventos de maior nível, cuja ocorrência é regida por eventos básicos com distribuições de probabilidade aplicadas e

conectados a uma porta lógica OU, terá uma probabilidade de ocorrência de acordo com a expressão:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$$

Da mesma forma, os eventos de maior nível, cuja ocorrência é regida por eventos básicos com distribuições de probabilidade aplicadas e conectados a uma porta lógica E, terá uma probabilidade de ocorrência de acordo com a expressão:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

A combinação de expressões gera a expressão geral da probabilidade de ocorrência do evento topo em função do tempo que será utilizada para a estimação de métricas de desempenho do sistema.

Segundo Fogliatto (2009) a relação lógica obtida para confiabilidade é semelhante à relação utilizada para a estimação da disponibilidade.

Para um sistema composto de eventos básicos conectados por uma porta lógica OU, temos:

$$A_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - A_i(t)]$$

De forma análoga, para um sistema composto de eventos básicos conectados por uma porta lógica E, obtêm-se:

$$A_s(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t)$$

Tais relações se mostram importantes para o desenvolvimento do modelo, o qual dependerá das distribuições formadoras do parâmetro disponibilidade  $A(t)$ .

#### ***4.2 Hibridismo entre Árvore de Sucesso e Análise de Markov***

A Análise de Markov ao proporcionar a curva de evolução da probabilidade instantânea, para um determinado estado em que o sistema se encontra, nos fornece a possibilidade de aplicar a lógica booleana a um conjunto de curvas referentes a um mesmo estado entre componentes diferentes.

A resolução do sistema de equações diferenciais das Cadeias de Markov, normalmente, evolve a utilização de métodos numéricos como Runge-Kutta de 4ª ordem acoplado à técnica de Monte Carlo.

Para Cadeias de Markov com poucos estados, é possível resolver o sistema de equações de forma analítica, dispensando a necessidade dos métodos numéricos.

O resultado é uma equação em função do tempo da probabilidade acumulada de sucesso ou falha, dependendo das características do estado analisado.

Da aplicação da lógica booleana nas equações obtidas na Análise de Markov, por meio da Árvore de Sucesso, podem ser estimadas as probabilidades conjuntas para uma quantidade de pontos e plotadas em forma de gráfico

Deve-se ter em mente que as distribuições de probabilidade possuem suas Curvas de Densidade de Probabilidade (*pdf*) e Probabilidade Acumulada (*cdf*), sendo a segunda a de interesse neste estudo.

#### 4.3 Cadeia de Markov com 3 estados

Na seção 3.10, que tratou da Análise Markoviana, foi estudada a cadeia com 02 estados. A literatura cita cadeias complexas para estudos de confiabilidade específicos. Citam-se os trabalhos de Siqueira (2003) quando trata da modelagem dos estados possíveis de um equipamento sujeito a determinados tipos de manutenção quando estuda a confiabilidade de sistemas de potência despachados a determinada carga.

Segundo Dhillon (2006) o modelo para 03 (três) estados pode ser assim representado:

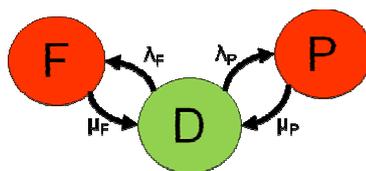


Figura 7 - Cadeia de Markov com 3 estados

Onde:

Estado *D* = estado em que o equipamento se encontra operando ou apto a operar;

Estado *F* = estado em que o equipamento se encontra indisponível de forma forçada;

Estado *P* = estado em que o equipamento se encontra indisponível de forma programada;

$\lambda_f$  = taxa de manutenção forçada (taxa de desligamento forçado);

$\mu_f$  = taxa de reparo forçado;

$\lambda_p$  = taxa de manutenção programada;

$\mu_p$  = taxa de reparo programado.

Por convenção adotaremos índices para os estados, utilizaremos  $D$  para denotar o estado disponível,  $F$  para o estado indisponível por manutenção forçada e  $P$  para o estado indisponível por manutenção programada.

$$\begin{aligned} \frac{dP_D(t)}{dt} + (\lambda_f + \lambda_p)P_D(t) &= \mu_f P_F(t) + \mu_p P_P(t) \\ \frac{dP_P(t)}{dt} + \mu_p P_P(t) &= \lambda_p P_D(t) \\ \frac{dP_F(t)}{dt} + \mu_f P_F(t) &= \lambda_f P_D(t) \end{aligned} \quad (44)$$

Para o estudo, admitiu-se que no instante  $t = 0$ ,  $P_D(0) = 1$  e  $P_P(0) = P_F(0) = 0$  como condições de contorno.

Resolvendo as equações anteriores, obtêm-se:

$$\begin{aligned} P_D(t) &= \frac{\mu_p \mu_f}{m_1 m_2} + \left[ \frac{(m_1 + \mu_p)(m_1 + \mu_f)}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[ \frac{(m_2 + \mu_p)(m_2 + \mu_f)}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \\ P_F(t) &= \frac{\lambda_f \mu_p}{m_1 m_2} + \left[ \frac{\lambda_f m_1 + \lambda_f \mu_p}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[ \frac{(\mu_p + m_2)\lambda_f}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \\ P_P(t) &= \frac{\lambda_p \mu_f}{m_1 m_2} + \left[ \frac{\lambda_p m_1 + \lambda_p \mu_f}{m_1(m_1 - m_2)} \right] e^{m_1 t} - \left[ \frac{(\mu_f + m_2)\lambda_p}{m_2(m_1 - m_2)} \right] e^{m_2 t} \end{aligned} \quad (45)$$

onde

$$\begin{aligned} m_1, m_2 &= \frac{-B \pm [B^2 - 4(\mu_p \mu_f + \lambda_f \mu_p + \lambda_p \mu_f)]^{1/2}}{2} \\ B &\equiv (\mu_f + \mu_p + \lambda_f + \lambda_p) \\ m_1 + m_2 &= -B \\ m_1 m_2 &= \mu_p \mu_f + \lambda_p \mu_f + \lambda_f \mu_p \end{aligned}$$

A disponibilidade do sistema em estado estacionário e dada pela equação:

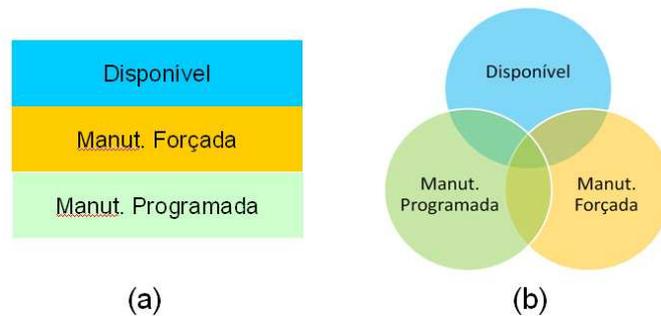
$$A_{SS} = \frac{\mu_f \mu_p}{\mu_p \mu_f + \lambda_p \mu_f + \lambda_f \mu_p}$$

As manipulações algébricas para confirmação da veracidade das expressões foram realizadas no *software* Maple© 12.00 da Waterloo Maple Inc. o qual é especializado em manipulações simbólicas.

Os scripts gerados para verificação dos resultados são parte integrante do apêndice desta dissertação.

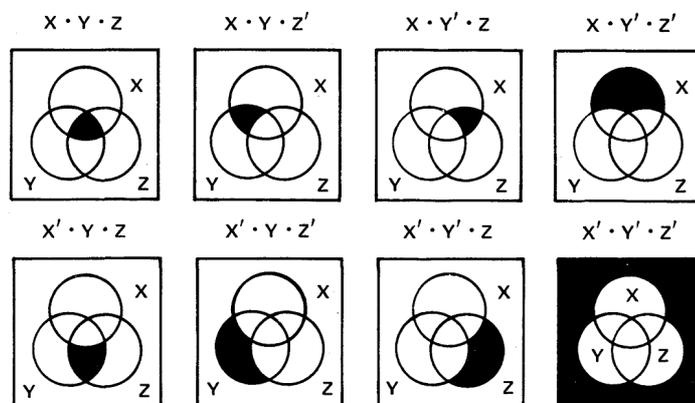
**4.4 Manipulação de Interseções nas Probabilidades Resultantes**

Os valores de probabilidade obtidos pela avaliação das equações 45 da seção 4.3 são válidas para 01 (um) equipamento ou sistema qualquer, porém para uma análise modular identificam-se interseções nas probabilidades, que se não devidamente tratadas apontarão resultados incorretos.



**Figura 8 - (a) Sistema único – Sem interseção; (b) Sistema composto – Diagrama de Venn**

Para sistemas compostos admitiu-se que existem situações em que alguns equipamentos estão sofrendo intervenção programada ou forçada sem indisponibilizar o sistema. É o caso de intervenções em equipamentos que possuam redundâncias.



**Figura 9 - Parcelas das probabilidades para 03 (três) estados.**

Para as definições ilustradas pelos Diagramas de Venn do quadro acima as probabilidades dos estados compostos podem ser representados pelas seguintes equações:

$$P_{D_{PURA}} = P_D \cdot (1 - P_F) \cdot (1 - P_P)$$

$$P_{F_{PURA}} = (1 - P_D) \cdot P_F \cdot (1 - P_P)$$

$$P_{P_{PURA}} = (1 - P_D) \cdot (1 - P_F) \cdot P_P$$

As interseções entre estados recebem tratamento similar, sendo em seguida ponderados para a apreciação dos estados individualizados:

$$P_{D \cap F} = P_D \cdot P_F \cdot (1 - P_P)$$

$$P_{D \cap P} = P_D \cdot (1 - P_F) \cdot P_P$$

$$P_{F \cap P} = (1 - P_D) \cdot P_F \cdot P_P$$

$$P_{D \cap F \cap P} = P_D \cdot P_F \cdot P_P$$

Das equações acima se extraem as formulações para tratamento dos resultados do sistema de equações da Cadeia de Markov e é possível contabilizar as probabilidades do sistema estar em cada um dos 03 (três) estados: Disponível, Indisponível por Manutenção Forçada e Indisponível por Manutenção Programada.

#### ***4.5 Análise de Tendências das Taxas de Transição***

As respostas dinâmicas da Cadeia de Markov, obtidas pela solução do sistema de equações diferenciais, possuem características de tenderem ao estado de equilíbrio ou estacionário.

Conforme apresentado acima, se pode obter o valor limite da resposta quando  $t \rightarrow \infty$ .

$$A_{SS} = \frac{\mu_f \mu_p}{\mu_p \mu_f + \lambda_p \mu_f + \lambda_f \mu_p}$$

A resposta do modelo com o aumento de  $t$ , assíntota a um eixo imaginário no valor de  $A_{SS}$ , conforme demonstrado no exemplo 1:

##### *Exemplo 1*

Considere um sistema sujeito às seguintes taxas de transição e retorno:

$$\lambda_f = \text{taxa de manutenção forçada} = 2e-3 \text{ [ndf/h]}$$

$\mu_f$  = taxa de reparo forçado =  $5e-2$  [nrf/h]

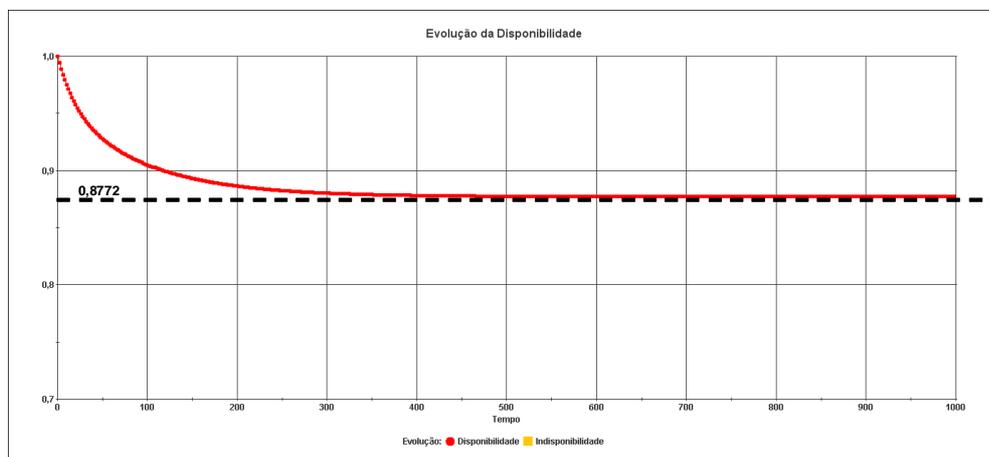
$\lambda_p$  = taxa de manutenção programada =  $1e-3$  [ndp/h]

$\mu_p$  = taxa de reparo programado =  $1e-2$  [nrp/h]

Substituindo estes valores na equação anterior, obtêm-se:

$$A_{ss} = \frac{(0,05 \times 0,01)}{(0,05 \times 0,01) + (0,001 \times 0,05) + (0,002 \times 0,01)} = 0,87719$$

Para este sistema o valor assintótico é conhecido, porém nosso interesse é a evolução da disponibilidade em função do tempo. A figura abaixo apresenta o gráfico da disponibilidade em função do tempo de acordo com a solução do sistema de equações da Cadeia de Marvov.



**Gráfico 2 - Exemplo de resposta assintótica para o modelo.**

Quando inserimos os parâmetros de forma nas taxas de transição, de acordo com a Lei de Potência (*Power Law*) utilizada no modelo Crow – AMSAA, percebemos que para diferentes valores de  $\beta$  obtêm-se comportamentos diferentes da resposta do modelo.

### *Exemplo 2*

Considere os mesmos dados do exemplo anterior, com a inclusão dos parâmetros de forma nas taxas de transição:

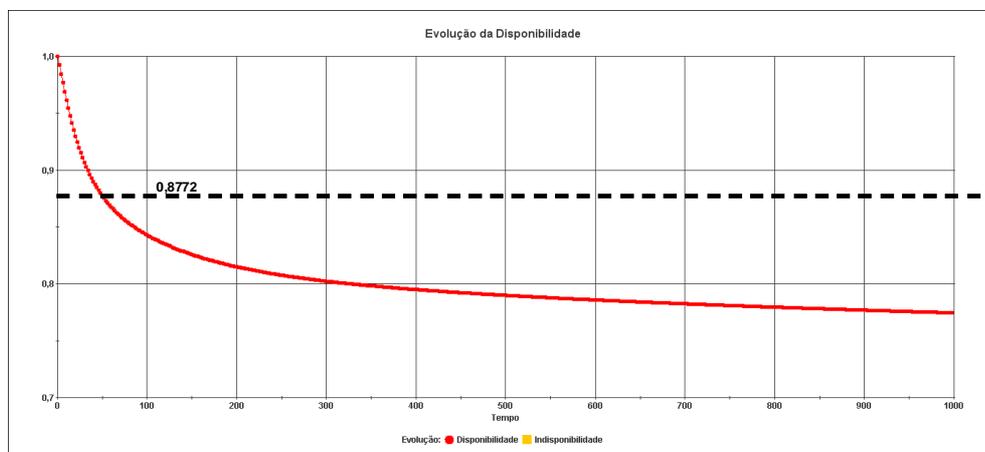
$\lambda_f = 2e-3$  ;  $\beta_f = 1,2$

$\mu_f = 5e-2$

$\lambda_p = 1e-3$  ;  $\beta_p = 1,0$

$\mu_p = 1e-2$

A resposta do modelo para este sistema é apresentada no gráfico:



**Gráfico 3 - Resposta do modelo submetido à parâmetro de forma.**

Observamos que para esta nova situação, o valor assintótico não foi respeitado devido ao fato que a disponibilidade em estado estacionário é, também, variável no tempo. Isso se deve ao caráter não constante da taxa de transição que ao ser maior que a unidade indica uma aceleração dos processos de desgaste do sistema, reduzindo sua disponibilidade devido ao aumento de intervenções de manutenção.

Conforme Reliasoft (2011) o valor do parâmetro de forma ( $\beta$ ) indica o grau de aceleração da deterioração ou desgaste do sistema analisado.

Sobre os valores de  $\beta$  se pode afirmar:

$\beta < 1$  – O sistema está melhorando, desgastando menos ou erros de projeto sendo corrigidos;

$\beta > 1$  – O sistema está perdendo desempenho, se desgastando mais ou incorporando defeitos.

Para taxas de transição sujeitas a parâmetros de forma, não se pode inferir sobre o valor de  $A_{SS}$ , devendo ser ponderadas as contribuições dos equipamentos com  $\beta > 1$  e dos com  $\beta < 1$ .

Para casos simples, como o *Exemplo 2*, em que o sistema é representado por uma Cadeia de Markov com 01 (nó) apenas e que o  $\beta_f > 1$  e  $\beta_p = 1$ , pode-se inferir que a disponibilidade de estado estacionário quando  $t \rightarrow \infty$  é  $A_{SS} = 0$ .

#### **4.6 Resposta do Modelo**

Os indicadores de desempenho preconizados nos Procedimentos de Rede do ONS, são parâmetros importantes para a gestão de ativos do SIN, tais parâmetros indicam quão eficiente

é o processo de Manutenção, Operação e Engenharia do agente que detêm a concessão do ativo.

Da análise das formulas de cálculo dos principais indicadores de desempenho, nota-se que são compostos por basicamente 06 (seis) variáveis. São elas:

- *NDF* – Número de desligamentos forçados
- *NDP* – Número de desligamentos programados
- *HIF* – Horas de desligamentos forçados
- *HIP* – Horas de desligamentos programados
- *HS* – Horas de serviço
- *HP* – Horas do período

Das variáveis acima, a única que não é possível determinar pelo modelo é *HS* que é então obtida pela análise do *FS* – *Fator de serviço*, que expressa a porcentagem do tempo do período que o sistema esteve, efetivamente, em operação.

Esta análise se faz necessária devido ao fato que os indicadores de taxa de desligamentos consideram o tempo de serviço como intervalo de tempo, desconsiderando o tempo em que os ativos estavam aptos a operar (disponíveis).

$$HS = FS.HP$$

$$NDF = \lambda_f . HP^{\beta_f}$$

$$NDP = \lambda_p . HP^{\beta_p}$$

$$HIF = HP.P_f$$

$$HIP = HP.P_p$$

Da análise dos indicadores constantes do Procedimento de Rede do ONS, percebe-se que não foram estabelecidos indicadores de processo para Manutenção Programada, sendo, porém, um fator impactante na contabilização do Índice de Disponibilidade.

Para a matriz de resposta do modelo foram incluídos indicadores de Manutenção Programada para manter a coerência na análise.

Segundo o Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS em seu tópico 14.2.7.2 sobre Modelagem da Manutenção, o ONS admite:

*“(a) nos estudos de referência, os efeitos da manutenção preventiva não são considerados; (b) entretanto, na análise de confiabilidade convencional, tanto o parque gerador quanto a malha de transmissão podem ser modelados considerando o efeito da manutenção preventiva;*

*essa prática pode ser incorporada futuramente nos estudos de referência.”*

Entende-se que quando os termos Manutenção Preventiva são citados, estão englobando a Manutenção Programada.

#### **4.6.1. Taxa de Desligamento Programado**

$$TDP = \frac{\sum_{i=1}^n (NDP_i)}{\sum_{i=1}^n (HX_i)} 8760$$

Onde:

$NDP_i$  – Número de desligamentos programados no ativo  $i$ , nos últimos 12 meses.

$HX_i$  – Número de Horas de serviço do ativo  $i$ , nos últimos 12 meses.

$n$  – Número total de equipamentos.

8760 – Fator de anualização.

Foi definido que as respostas do modelo respeitam a unidade de tempo em horas para os valores de entrada e de saída e por isso o valor da taxa de desligamento programado não foi anualizada.

#### **4.6.2. Tempo Médio de Reparo Programado**

$$TMRP = \frac{\sum_{i=1}^n (HIP_i)}{\sum_{i=1}^n (NDP_i)}$$

Onde:

$HIP_i$  – Número de horas em que a função ficou indisponível para operação e entregue à manutenção programada, devido ao evento  $i$ ;

$NDP_i$  – Número de desligamentos forçados do equipamento ou da instalação  $i$ .

Por convenção, definimos a taxa de retorno  $\mu_p$  como o inverso do  $TMRP$ :

$$\mu_p = \frac{\sum_{i=1}^n (NDP_i)}{\sum_{i=1}^n (HIP_i)}$$

Quando avaliadas as variáveis e inseridas nas fórmulas dos indicadores, obtém-se como resposta do modelo uma tabela de indicadores:

**Tabela 3 – Resposta do modelo para os dados do *Exemplo 1*.**

Tabela de Indicadores de Saída do Modelo	
Disponibilidade Média	88,61%
Indisponibilidade Forçada Média	3,28%
Indisponibilidade Programada Média	8,11%
Indisponibilidade Preventiva Média	0,00%
Taxa de Desligamento Forçado Médio	2,00E-03
Tempo Médio entre Desligamentos Forçados	500,00
Taxa de Reparo Forçado Médio	6,10E-02
Tempo Médio de Reparo Forçado	16,40
Taxa de Desligamento Programado Médio	1,00E-03
Tempo Médio entre Desligamentos Programados	1000,00
Taxa de Reparo Programado Médio	1,23E-02
Tempo Médio de Reparo Programado	81,07
Número de Desligamentos Forçados	2,00
Número de Desligamentos Programados	1,00
Tempo de Indisponibilidade Forçada	32,79
Tempo de Indisponibilidade Programada	81,07
Tempo de Indisponibilidade Preventiva	0,00
Tempo de Indisponibilidade	113,86
Tempo Disponível	886,14
Tempo em Serviço	1000,00
Tempo Total	1000,00
Custo de Manutenção Programada	0,00
Custo de Manutenção Forçada	0,00
Custo de Manutenção Preventiva	0,00
Custo de Manutenção Total	0,00
Custo de Aquisição	0,00
Instante inicial	0,00
Instante final	1000,00

**Unidades de tempo em [horas].**

## 5. Implementação Computacional

O modelo proposto foi implementado em um *software* para reduzir as manipulações algébricas e facilitar a geração de gráficos e tabelas personalizadas.

Foi utilizado para implementação a plataforma NetBeans IDE 6.5.1 da Sun Microsystems® utilizando a versão 1.6.0.05 da máquina virtual Java.

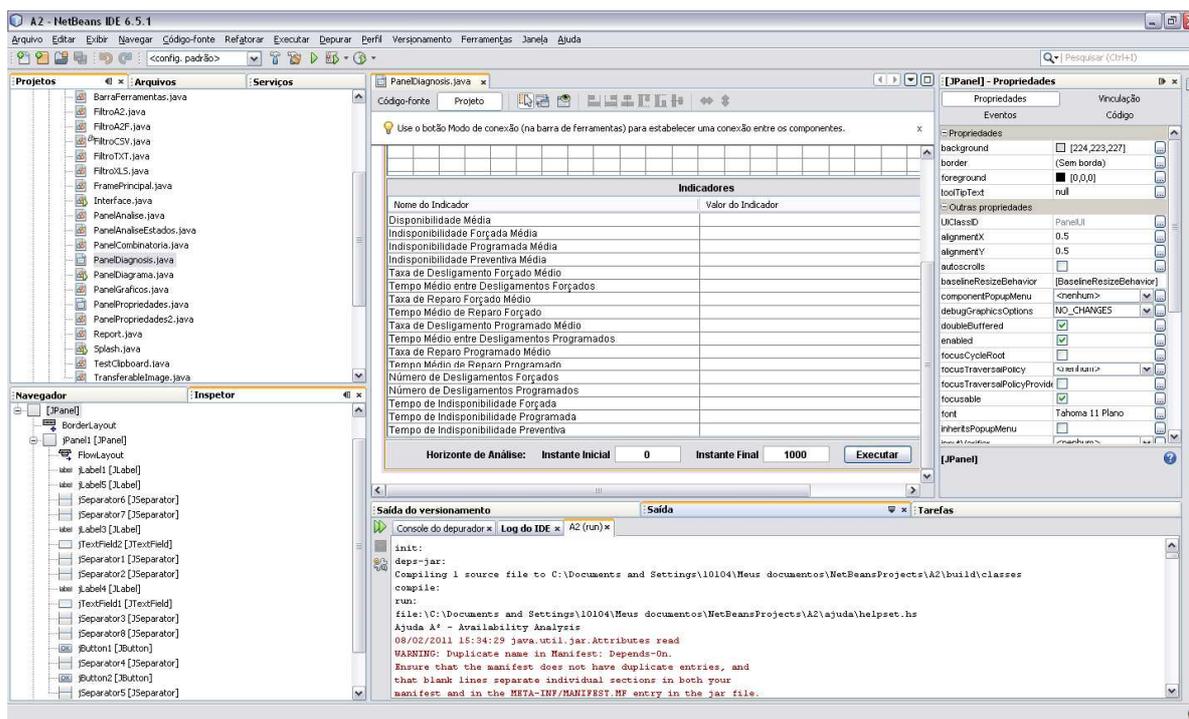


Figura 10 - Interface do NetBeans IDE 6.5.1

As validações das metodologias propostas utilizaram o *software* MiniTab® da MiniTab Inc., o qual é composto por módulos estatísticos para a estimação de parâmetros na análise de sistemas reparáveis.

### 5.1 Sistema *jMyNHPP*

O sistema *jMyNHPP* é uma aplicação desenvolvida com o objetivo de estimar os parâmetros da Lei de Potência para um conjunto de dados de desligamentos.

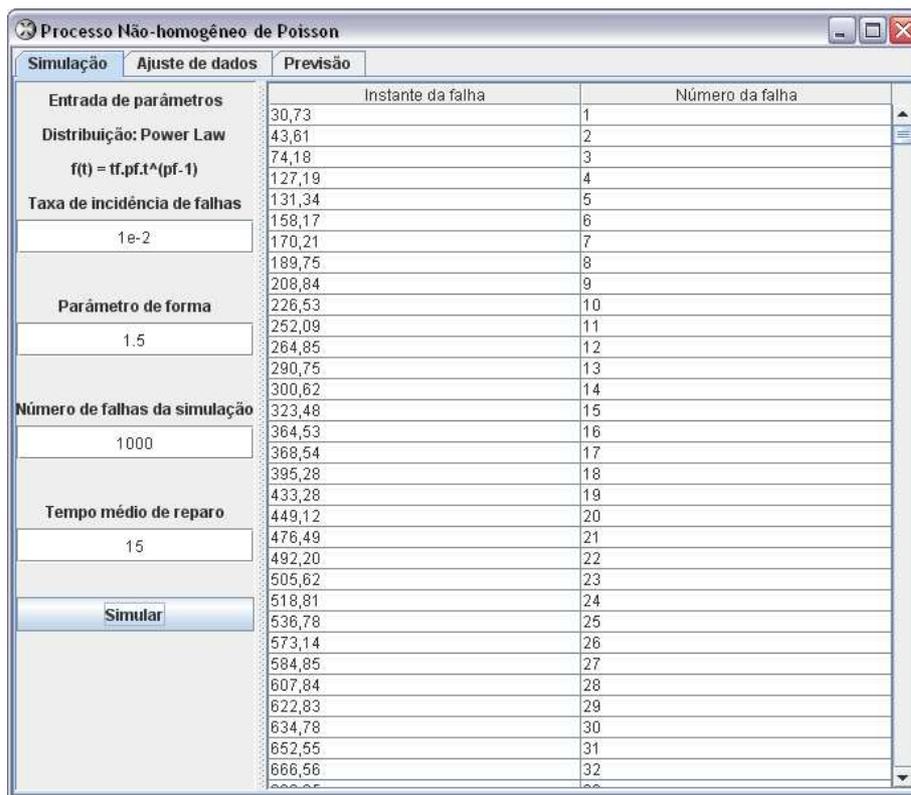
O sistema utiliza a metodologia de análise das probabilidades segundo o Método Não-homogêneo de Poisson, o qual admite qualquer distribuição de probabilidade para a ocorrência de eventos.

A aplicação possui um *plug-in* com o MS-Excel® que permite ao usuário selecionar e colar na tabela do sistema os dados desejados.

	Número	Instante	Duração
1	8	15	
2	39	15	
3	47	15	
4	82	15	
5	103	15	
6	118	15	
7	150	15	
8	162	15	
9	193	15	
10	215	15	
11	217	15	
12	237	15	
13	252	15	
14	278	15	
15	304	15	
16	349	15	
17	352	15	
18	376	15	
19	389	15	
20	409	15	
21	420	15	
22	450	15	
23	473	15	
24	489	15	
25	508	15	
26	523	15	
27	541	15	
28	576	15	
29	598	15	
30	619	15	
31	662	15	
32	680	15	

Figura 11 - Ajuste de dados no *software* jMyNHPP.

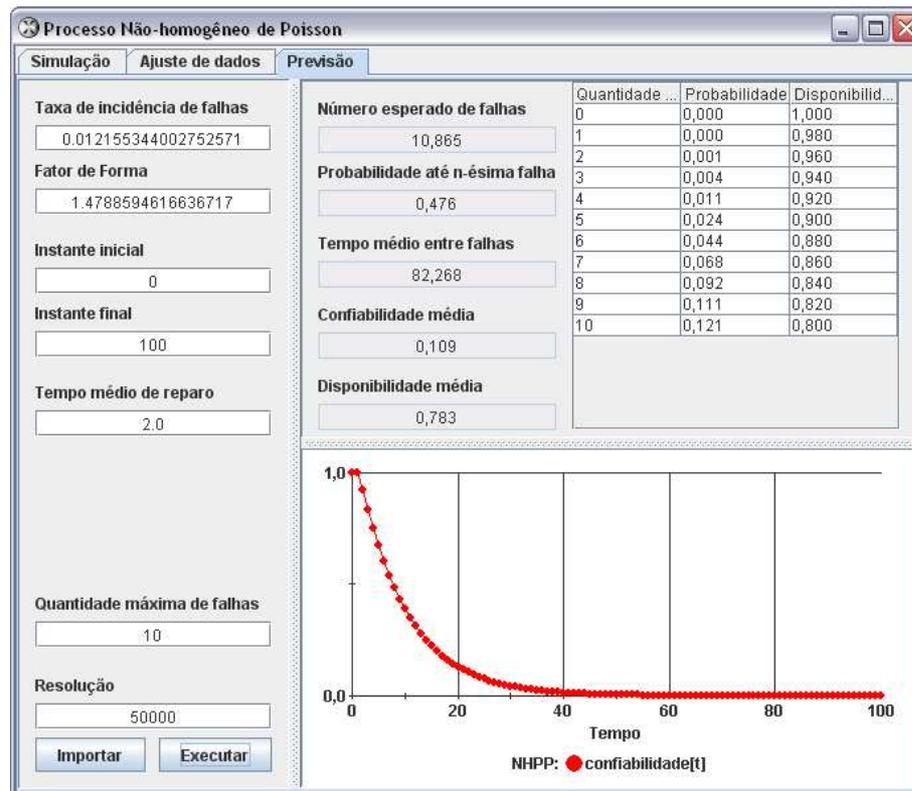
Em outra aba do sistema é permitido ao usuário gerar instantes de desligamentos com base nos parâmetros de escala e forma inseridos. Os instantes gerados podem ser exportados para a aba de estimação dos parâmetros e o nível de convergência dos métodos de estimação pode ser observado.



**Figura 12 - Simulação de instantes de desligamentos para validação no jMyNHPP.**

A última aba do sistema permite ao usuário visualizar em forma de gráfico a confiabilidade, ou probabilidade do sistema não desligar, em um período de tempo desejado. Estão disponíveis tabelas auxiliares que apresentam dados de disponibilidade, confiabilidade média e número esperado de desligamentos.

Outra tabela auxiliar apresenta a probabilidade de ocorrência de um número  $N$  de desligamentos, sendo tal probabilidade para  $N = 0$  igual à confiabilidade do sistema para o período.



**Figura 13 - Previsão do número de desligamentos com base no ajuste do jMyNHPP.**

O sistema jMyNHPP foi, posteriormente, incorporado ao sistema A<sup>2</sup> para permitir maior flexibilidade ao analista.

## 5.2 Sistema A<sup>2</sup> - Availability Analysis

O sistema A<sup>2</sup> - *Availability Analysis*, Análise de Disponibilidade em português, é um ambiente de criação, edição, análise e elaboração de relatórios para Analistas de Desempenho e Gestores de Ativos.

Denominação	Descrição do parâmetro	Valor atribuído
E1	[Escala] Manut. Forçada	0.0010
	[Forma] Manut. Forçada	1.1
	[Escala] Reparo Forçado	0.1
	[Forma] Reparo Forçado	1.0
	Custo de Manut. Forçada	3456.0
	[Escala] Manut. Programada	0.1
	[Forma] Manut. Programada	0.6
	[Escala] Reparo Programado	0.01
	[Forma] Reparo Programado	1.0
	Custo de Manut. Programada	1234.0
	Periodicidade Preventiva	
	Duração Média Preventiva	
	Custo da Manut. Preventiva	
	Custo de Aquisição	
	Fator de Serviço	

Figura 14 - Interface do sistema A<sup>2</sup> - *Availability Analysis*.

Todas as funcionalidades padrão de *softwares* comerciais foram inseridas no sistema, o que garante uma maior produtividade ao analista e aumento da organização dos arquivos e pastas contendo os arquivos de modelo.

Um ponto importante é o tratamento de exceções aos dados de entrada, garantindo que o usuário será informado detalhadamente sobre o local onde houve erro de conversão numérica para correção.

O ambiente é composto por diferentes abas com funcionalidades específicas, as quais serão abordadas a seguir.

### 5.2.1. Edição

A aba de edição tem a função de possibilitar ao analista a inserção gráfica da topologia da árvore de sucesso do sistema, contemplando as redundâncias e gargalos do processo produtivo ou sistema analisado.

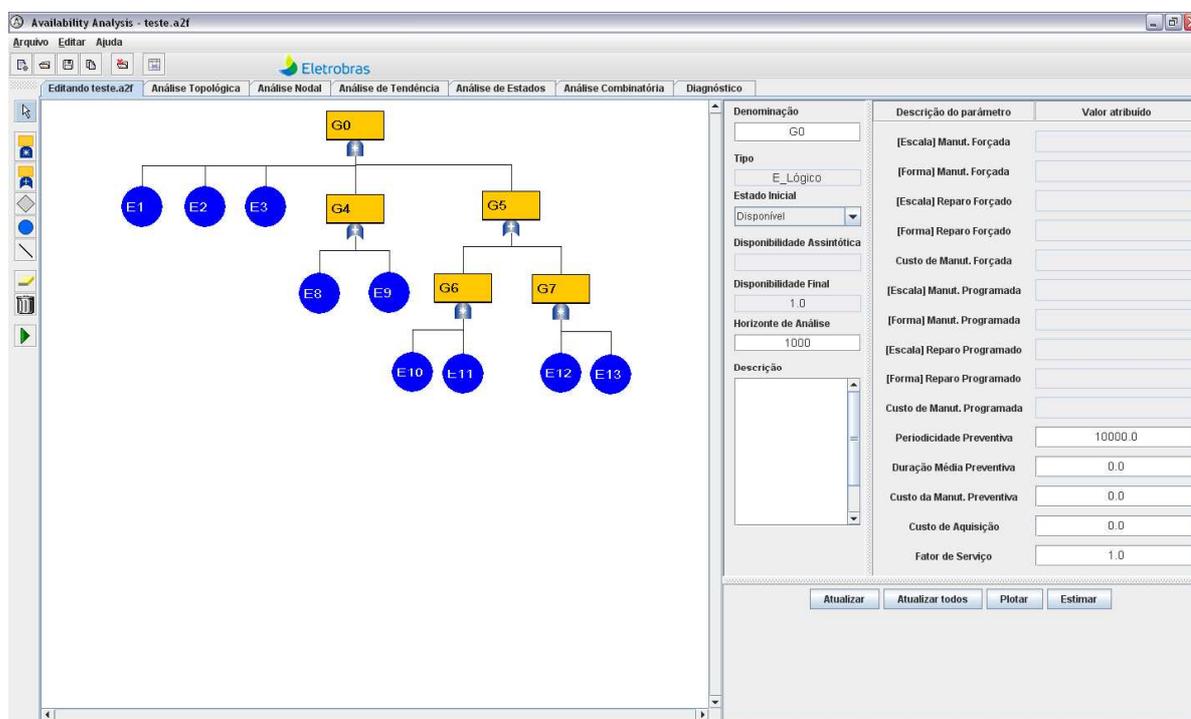


Figura 15 - Aba Edição do sistema A<sup>2</sup>.

É nesta aba, ainda, que são inseridos todos os parâmetros dos nós que alimentarão o modelo a ser simulado.

Os dados de entrada para os nós (azul) e para as portas lógicas (laranja) são diferentes, sendo os campos habilitados ou desabilitados de acordo com o objeto selecionado.

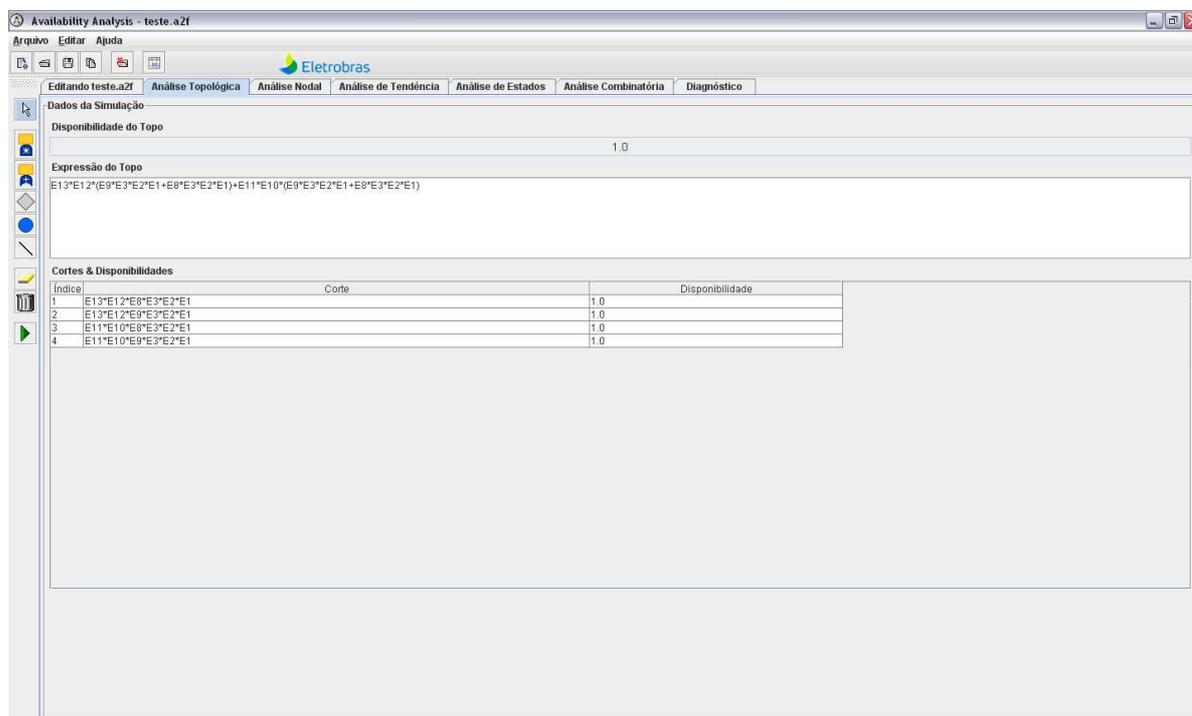
Para a análise da indisponibilidade por manutenção preventiva, admitiu-se que somente as portas lógicas receberão dados de entrada para caracterizar tal atividade, portanto, são as portas lógicas que melhor representam os equipamentos e sistemas complexos submetidos à Manutenção Preventiva.

### 5.2.2. Análise Topológica

A aba de Análise Topológica apresenta o valor da disponibilidade instantânea (probabilidade acumulada de sucesso) ao final da missão (Horizonte de Análise) e a expressão booleana que caracteriza a Árvore de Sucesso inserida na aba Edição.

A expressão booleana é decomposta para verificarmos os cortes mínimos da árvore que são os menores caminhos que chegam ao evento topo (sucesso).

Para uma definição de Cortes Mínimos, ver Firmino (2006).



**Figura 16 - Aba Análise Topológica do sistema A<sup>2</sup>.**

### 5.2.3. Análise Nodal

Esta aba possibilita ao analista a análise individualizada de nós (eventos terminais), apresentando em forma de tabela os dados inseridos na aba Edição e permitindo sua modificação sem alterar os dados do nó original.

Esta análise é, particularmente, interessante quando se tem árvores complexas cuja avaliação individualizada se faz necessária para determinar a contribuição de um nó específico.

São disponibilizados recursos adicionais de aplicação de portas lógicas dos tipos *E* e *OU* para todos os nós selecionados. Este recurso permite que se analise a curva de disponibilidade de um subsistema da árvore de sucesso sem a necessidade de criar um novo arquivo.

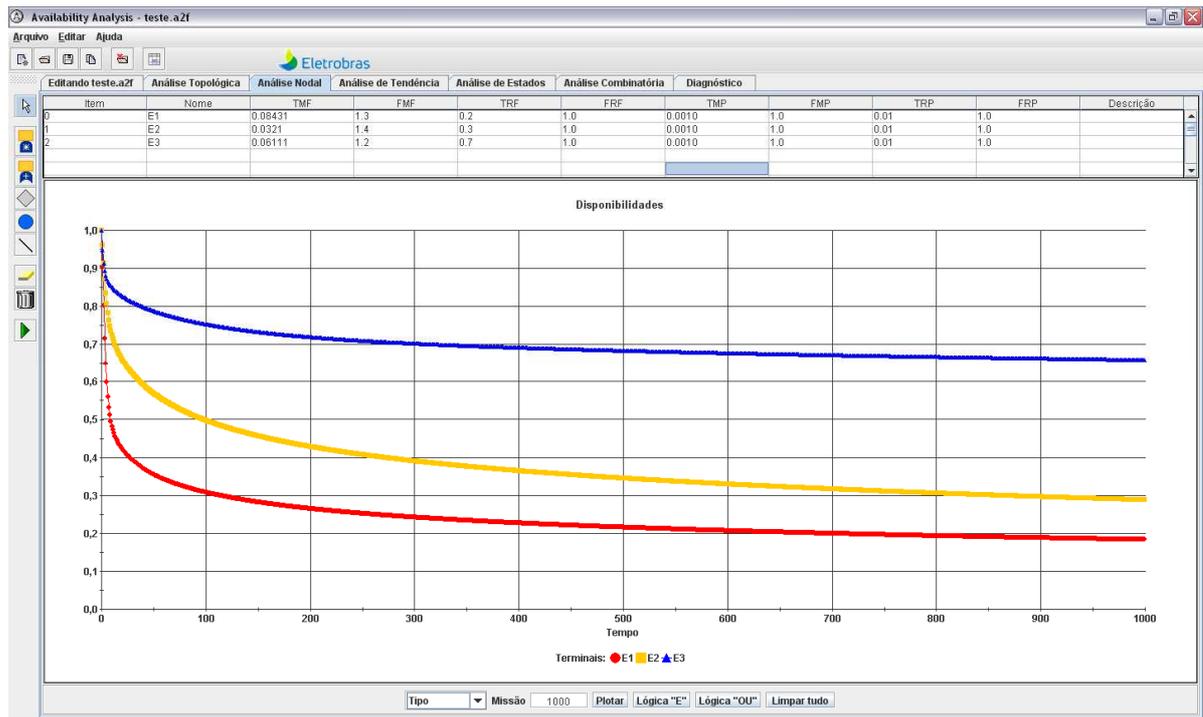
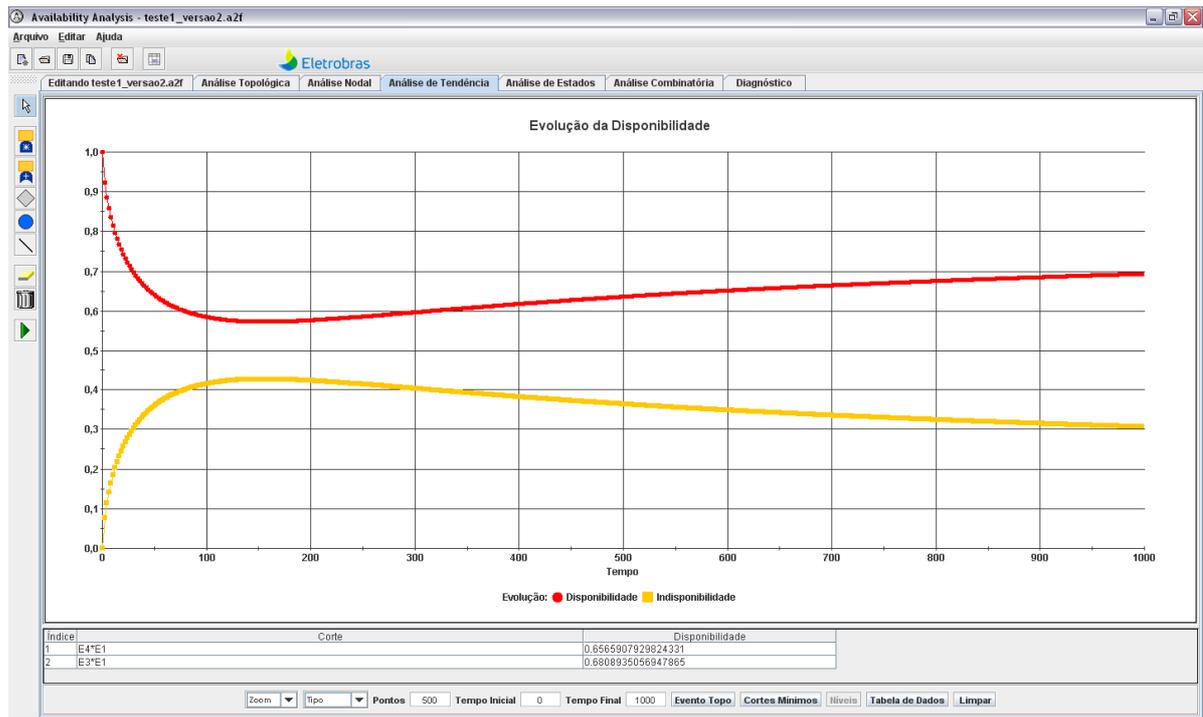


Figura 17 - Aba Análise Nodal do sistema A<sup>2</sup>.

#### 5.2.4. Análise de Tendências

A Análise de Tendências é uma das principais funcionalidades do sistema A<sup>2</sup>, além do gráfico da Evolução da Disponibilidade em função do tempo para o sistema, podem ser plotadas as curvas para cada corte mínimo apresentado na aba Análise Topológica.



**Figura 18 - Aba Análise de Tendência do sistema A<sup>2</sup> - Probabilidade do Topo.**

Com a finalidade de auxiliar o analista na geração de relatório o sistema permite copiar o gráfico para a Área de Transferência do computador para que possa ser colado em quaisquer *softwares* de escritório.

Uma opção interessante é a disponibilização dos resultados numéricos em formato de tabela, a qual pode ser copiada e colada em planilhas eletrônicas para a geração personalizada dos gráficos para relatório.

**Tabela 4 – Resultados numéricos do modelo para exportação.**

Index	Tempo	Disponibilidade	Indisponibilidade
200	400	0,6040773353892	0,3959226646108
201	402	0,6044526995845	0,3955473004155
202	404	0,604826929923	0,395173070077
203	406	0,6052000206435	0,3947999793565
204	408	0,6055719663718	0,3944280336282
205	410	0,6059427621088	0,3940572378912
206	412	0,6063124032175	0,3936875967825
207	414	0,6066808854119	0,3933191145881
208	416	0,6070482047448	0,3929517952552
209	418	0,6074143575971	0,3925856424029
210	420	0,6077793406666	0,3922206593334
211	422	0,608143150958	0,391856849042
212	424	0,6085057857721	0,3914942142279
213	426	0,6088672426966	0,3911327573034
214	428	0,6092275195958	0,3907724804042
215	430	0,6095866146019	0,3904133853981
216	432	0,6099445261057	0,3900554738943
217	434	0,610301252748	0,389698747252
218	436	0,6106567934108	0,3893432065892
219	438	0,6110111472098	0,3889888527902
220	440	0,6113643134855	0,3886356865145
221	442	0,6117162917962	0,3882837082038
222	444	0,6120670819102	0,3879329180898
223	446	0,6124166837984	0,3875833162016
224	448	0,6127650976277	0,3872349023723
225	450	0,6131123237535	0,3868876762465
226	452	0,6134583627137	0,3865416372863
227	454	0,6138032152218	0,3861967847782
228	456	0,6141468821611	0,3858531178389
229	458	0,6144893645781	0,3855106354219
230	460	0,6148306636771	0,3851693363229
231	462	0,6151707808141	0,3848292104189

Uma tabela contendo os cortes mínimos e as probabilidades ao final da missão é apresentada abaixo dos gráficos. Isto permite ao analista identificar quais nós contribuem para cada curva plotada.

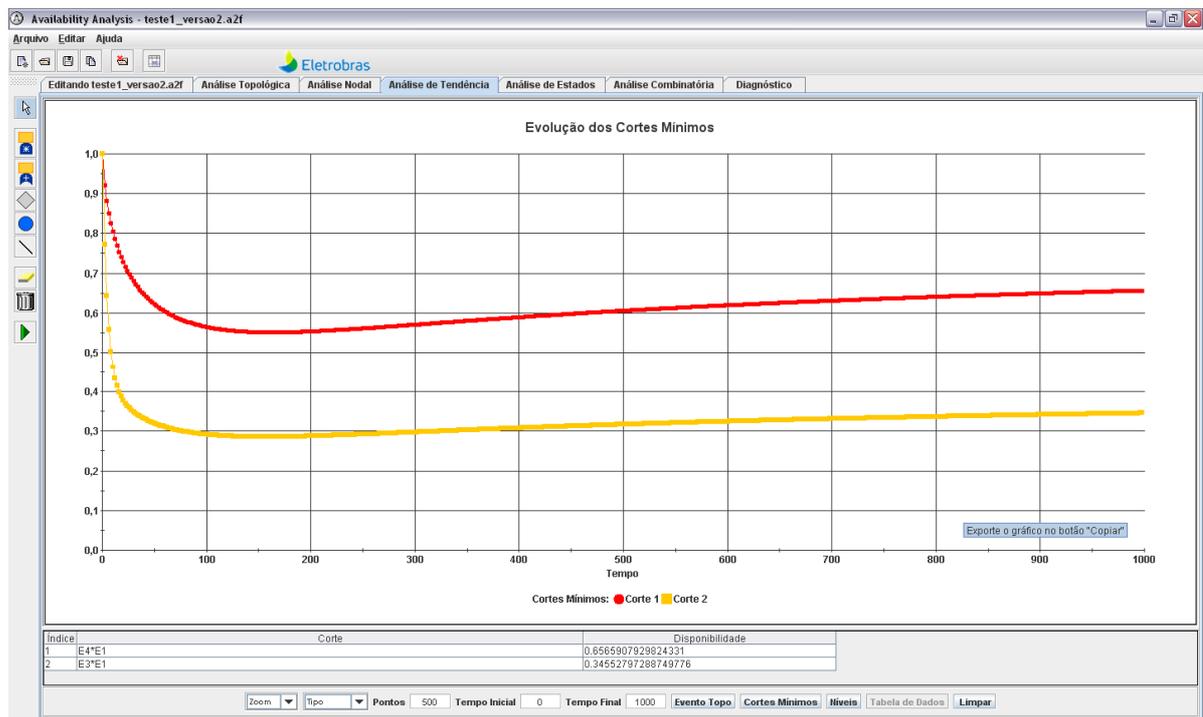
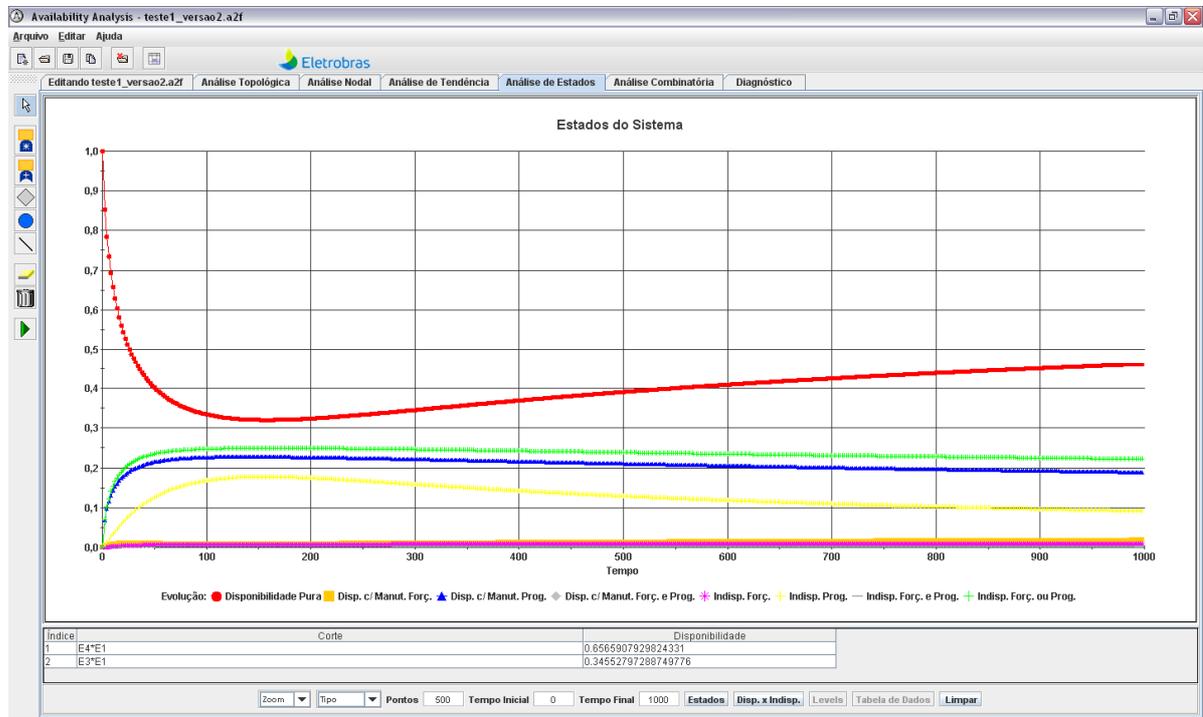


Figura 19 - Análise de Tendências para os Cortes Mínimos da Árvore de Sucesso.

### 5.2.5. Análise de Estados

A Análise de Estados permite a visualização gráfica das decomposições das probabilidades resultantes do modelo para as interseções entre estados.

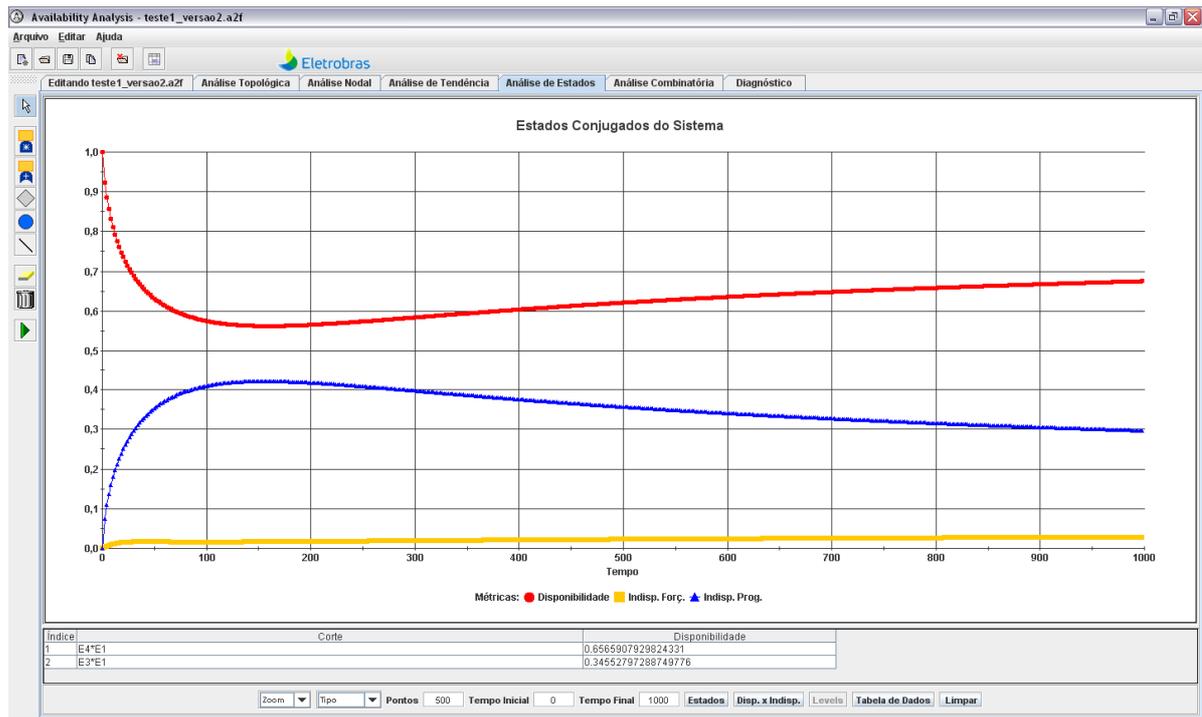
Similarmente a aba de Análise de Tendências é apresentada a tabela contendo os cortes mínimos da árvore, o que auxilia na identificação dos nós críticos.



**Figura 20 - Aba Análise de Estados do sistema A<sup>2</sup>.**

É disponibilizada ao analista a opção de agregação dos estados puros para visualização das curvas de probabilidades individualizadas.

Este recurso é, especialmente, interessante para a percepção do tipo de indisponibilidade predominante no sistema, com a finalidade de dar suporte ao projeto.



**Gráfico 4 - Curvas dos estados agregados da resposta do modelo.**

Semelhante à aba Análise de Tendências é disponibilizada uma tabela de dados contendo os resultados agregados por estado para aumentar a flexibilidade do analista na elaboração de relatórios e análises aprofundadas.

**Tabela 5 – Dados agregados da resposta do modelo para geração de relatórios.**

Index	Tempo	Disponibilidade	Indisp. Forçada	Indisp. Programada
50	100	0,5751410091572	0,0153174112212	0,4095415796216
51	102	0,5741254949396	0,0153201764572	0,4105543286032
52	104	0,5731692559158	0,0153244780288	0,4115062660553
53	106	0,5722697535104	0,0153302613495	0,4123999851401
54	108	0,5714245766292	0,0153374728759	0,413237950495
55	110	0,570631433528	0,0153460602663	0,4140225062057
56	112	0,5698881443436	0,0153559724961	0,4147558831603
57	114	0,5691926342188	0,0153671599402	0,415440205841
58	116	0,5685429269654	0,0153795744267	0,4160774986079
59	118	0,5679371392108	0,0153931692694	0,4166696915197
60	120	0,5673734749852	0,0154078992818	0,417218625733
61	122	0,5668502207061	0,0154237207764	0,4177260585175
62	124	0,5663657405263	0,0154405915538	0,4181936679199
63	126	0,5659184720108	0,0154584708817	0,4186230571074
64	128	0,5655069221158	0,015477319468	0,4190157584163
65	130	0,5651296634419	0,0154970994279	0,4193732371302
66	132	0,5647853307404	0,0155177742481	0,41969898950115
67	134	0,5644726176501	0,0155393087474	0,419980736025
68	136	0,5641902736462	0,0155616890358	0,4202480573181
69	138	0,5639371011852	0,0155848224727	0,4204780763422
70	140	0,5637119530293	0,0156087376242	0,4206793093465
71	142	0,5635137297371	0,0156333842207	0,4208528860422
72	144	0,5633413773072	0,0156587331144	0,42099989895783
73	146	0,5631938849648	0,0156847562376	0,4211213587976
74	148	0,5630702830786	0,0157114265618	0,4212182903595
75	150	0,5629696412006	0,0157387180579	0,4212916407415
76	152	0,5628910662186	0,015766605657	0,4213423281244
77	154	0,5628337006145	0,0157950652132	0,4213712341723

**5.2.6. Diagnóstico**

A aba Diagnóstico apresenta os indicadores de desempenho (processo e resultados) simulados para o sistema.

Os valores dos indicadores são obtidos pela combinação lógica da árvore de sucesso dinâmica aplicada para cadeias de Markov com 03 (três) estados possíveis e com manipulações da teoria dos conjuntos.

A aba apresenta na parte superior um relatório da árvore de sucesso contendo todos os dados inseridos pelo analista.

Na parte inferior a aba apresenta uma tabela contendo os indicadores simulados, conforme as definições estabelecidas pelos órgãos competentes.

Pode-se observar que a tabela já simula os indicadores de Manutenção Programada e relativos aos custos.

Index	Nome	Tipo	Gerente	Disp. Fi.	TMP	FMP	TRF	FRF	NDP	CRP	TMP	FMP	TRP	FRP	NDP	CRP	Períod.	Duração	NDPr	CMP	CA	FS	Descrição	
0	GO	Porta E		87,56%					5,192E01						6,311E00		4,000E04	7,000E02	2,500E...	2,340E02	2,222E08	78,00%	Evento 1	
1	E1	Terminal	G0	89,47%	1,000E-	1,100E00	1,000E-	1,000E00	1,995E00	3,458E03	1,000E-	6,000E-	1,000E-	1,000E00	6,310E00	1,234E03								Evento 2
2	G2	Porta OU	O0	97,26%					4,993E01						1,443E-		3,000E03	5,000E00	3,333E-	3,450E02	3,457E04	100,00%	Porta O...	
3	E3	Terminal	G2	49,75%	1,000E-	1,000E00	1,000E-	1,000E00	1,000E02	0,000E00	1,000E-	1,000E00	1,000E-	1,000E00	1,000E-	0,000E00							Evento 3	
4	E4	Terminal	G2	94,54%	1,000E-	1,200E00	1,000E-	1,000E00	3,981E00	4,560E02	1,000E-	1,000E00	1,000E-	1,000E00	1,000E-	6,780E02							Evento 4	

Nome do Indicador	Valor do Indicador
Disponibilidade Média	0,6173596351067
Indisponibilidade Forçada Média	0,0203044736097
Indisponibilidade Programada Média	0,3434729805737
Indisponibilidade Preventiva Média	0,0188629107098
Taxa de Desligamento Forçado Médio	0,0653100055752
Tempo Médio entre Desligamentos Forçados	15,3115895872128
Taxa de Reparo Forçado Médio	3,2165328109775
Tempo Médio de Reparo Forçado	0,31089376629
Taxa de Desligamento Programado Médio	0,0079991118717
Tempo Médio entre Desligamentos Programados	125,0138785448504
Taxa de Reparo Programado Médio	0,0232889115714
Tempo Médio de Reparo Programado	42,938889476883
Número de Desligamentos Forçados	50,941804348664
Número de Desligamentos Programados	6,2393072599549
Tempo de Indisponibilidade Forçada	15,8374394155621
Tempo de Indisponibilidade Programada	267,9089248475156
Tempo de Indisponibilidade Preventiva	14,7130703536694
Tempo Disponível	298,4594846167471
Tempo em Serviço	617,3596351067346
Tempo Total	780
Custo de Manutenção Programada	7764,079197254245
Custo de Manutenção Forçada	8527,036365060302
Custo de Manutenção Preventiva	118,5704172407167
Custo de Manutenção Total	16409,68797955263
Custo de Aquisição	2256789
Instante inicial	0
Instante final	1000

Figura 21 - Aba Diagnóstico do sistema A<sup>2</sup>.

No menu principal existe o item Editar, que possui a função de Geração de Relatório. Após selecionar esta opção o analista deverá entrar com o valor do Horizonte de Análise desejado, o qual será utilizado para calcular os valores de disponibilidade ao final da missão.

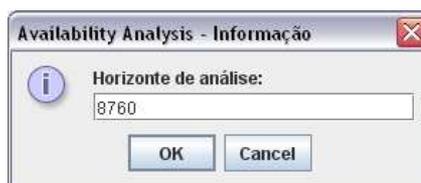


Figura 22 - Caixa de diálogo para entrada do Horizonte de Análise.

Após aceito o valor inserido para o Horizonte de Análise o sistema calculará as probabilidades para cada nó e cada porta lógica, inclusive a porta lógica do topo.

É apresentada uma tabela contendo todos os nós e portas lógicas, indicando na coluna *Genitor* a porta lógica cada nó está imediatamente conectado. Para a porta lógica do topo o valor permanece vazio.

Caracteriza-se boa prática para os analistas a inserção da descrição detalhada dos nós na criação da árvore de sucesso, estas informações serão importantes para o entendimento e leitura pelos não especialistas do relatório.

Index	Nome	Descrição	Tipo	Genitor	Disp. Fl.	TMF	FMP	TRF	FRF	NDF	CRF	TMP	FMP	TRP	FRP	NDP	CRP	Period	Duração	NDPr	CMP	CA	FS
0	G0	Evento Topo	Porta E		67,42%					4,600E...						2,321E...		4,000E...	7,000E02	2,190...	2,340E...	2,222...	78,00...
1	E1	Evento 1	Terminal	G0	69,32%	1,000E...	1,100E...	1,000E...	1,000E...	2,171E...	3,456E...	1,000E...	6,000E...	1,000E...	1,000E...	2,320E...	1,234E03						
2	G2	Porta OU n.1	Porta OU	G0	97,26%					4,382E...						1,264E...		3,000E...	5,000E00	2,920...	3,450E...	3,457...	100,0...
3	E3	Evento 3	Terminal	G2	49,75%	1,000E...	1,000E...	1,000E...	1,000E...	8,760E...	0,000E...	1,000E...	1,000E...	1,000E...	1,000E...	8,760E...	0,000E00						
4	E4	Evento 4	Terminal	G2	84,55%	1,000E...	1,200E...	1,000E...	1,000E...	5,383E...	4,560E...	1,000E...	1,000E...	1,000E...	1,000E...	8,760E...	6,780E02						

Figura 23 - Exemplo de relatório gerado para topologia pelo sistema A<sup>2</sup>.

## **6. Estudos de Caso**

Segundo Gil (2008), os estudos de caso são relativamente simples e econômicos, apresentam dificuldades de generalização, sendo muito utilizado em pesquisas exploratórias.

Os principais critérios para a seleção dos casos são: buscar casos típicos; selecionar casos extremos; tomar casos marginais (atípicos).

Os estudos de caso apresentados tem por finalidade apresentar a aplicação do modelo gerado pela pesquisa e responder à questão de pesquisa atendendo ao objetivo geral do trabalho.

### ***6.1 Estudo de Caso 1 – Sistema de Circulação de Óleo do MGG***

Com vistas a ilustrar a utilização da técnica desenvolvida, será apresentado um Estudo de Caso para um sistema existente em uma usina de produção de energia elétrica.

O sistema escolhido foi o de Circulação de Óleo do Mancal Guia do Gerador Elétrico devido as suas características de redundância de equipamentos, criticidade, representatividade, similaridade com outros sistemas e facilidade de interpretação dos diagramas funcionais.

#### ***6.1.1. Contexto Operacional***

Esse sistema tem como principal função circular o óleo a fim de retirar o calor gerado na região do mancal de guia superior, lubrificando-o e mantendo a temperatura entre 40 °C e 50 °C, a uma pressão de 320 kPa.

Está localizado em um dos geradores da usina hidrelétrica de Tucuruí, que possui 25 unidades geradoras, sendo 14 (quatorze) na Casa de Força I e 11 (onze) na Casa de Força II. Cada unidade geradora possui um sistema de circulação de óleo do MGG.

A falha do sistema de circulação de óleo do MGG interrompe o funcionamento da unidade geradora correspondente. Se a falha do sistema de circulação provocar danos ao mancal o procedimento de reparo, no pior caso, será em oficina externa e poderá se estender por até nove meses.

O mancal possui vida útil indeterminada desde que mantido e operado em condições normais. Qualquer falha que interrompe a geração e causa o aumento do despacho das demais unidades geradoras. Isso afeta o índice de disponibilidade da usina, e pode comprometer as paradas programadas das outras unidades.

Como hipótese a ser consolidada consideramos que 01 hora de indisponibilidade de 01 UGH da Casa de Força 2 implica em perda de oportunidade valorada em R\$ 3.375,00 (TEO/MRE).

### **6.1.2. Descrição do Sistema**

A retirada de calor é efetuada por meio da circulação do óleo de lubrificação por meio de bombeamento, passando por trocadores de calor água-óleo montados externamente ao poço do gerador.

Neste processo o óleo circula por filtros, posteriormente retornando a cuba.

O sistema é constituído pelos seguintes componentes:

- 02 conjuntos motor – bomba sendo que cada um é suficiente para proporcionar a vazão de óleo necessária;
- 02 trocadores de calor óleo-água sendo que cada um é suficiente para trocar o calor total gerado;
- 01 filtro de óleo de cesta dupla, com medidor de diferencial de pressão, o qual possibilita a limpeza do elemento filtrante sem a interrupção do fluxo de óleo e sem perder a continuidade da ação filtrante a fim de impedir partículas contaminantes maiores que 100 microns.
- 01 conjunto de instrumentos necessários à operação do sistema;
- 01 rede de tubulações.
- 01 Tanque reservatório de óleo.

Em condições normais, o sistema opera com 01 conjunto motor-bomba, 01 trocador de calor e o 01 filtro.

Caso a bomba em operação falhe, a mesma é detectada pela instrumentação, a segunda bomba entra automaticamente em funcionamento. No caso de trocadores de calor o intercâmbio é feito manualmente caso a troca de calor não esteja sendo suficiente, provavelmente devido ao acúmulo de sujeira internamente às placas.



Figura 24 - Foto do arranjo do Sistema de Circulação de Óleo do Mancal Guia do Gerador

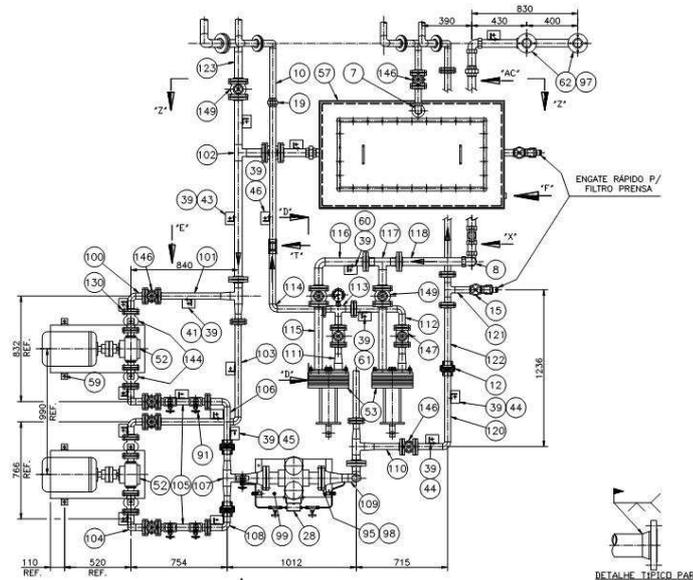


Figura 25 - Desenho do arranjo do Sistema de Circulação de Óleo do MGG

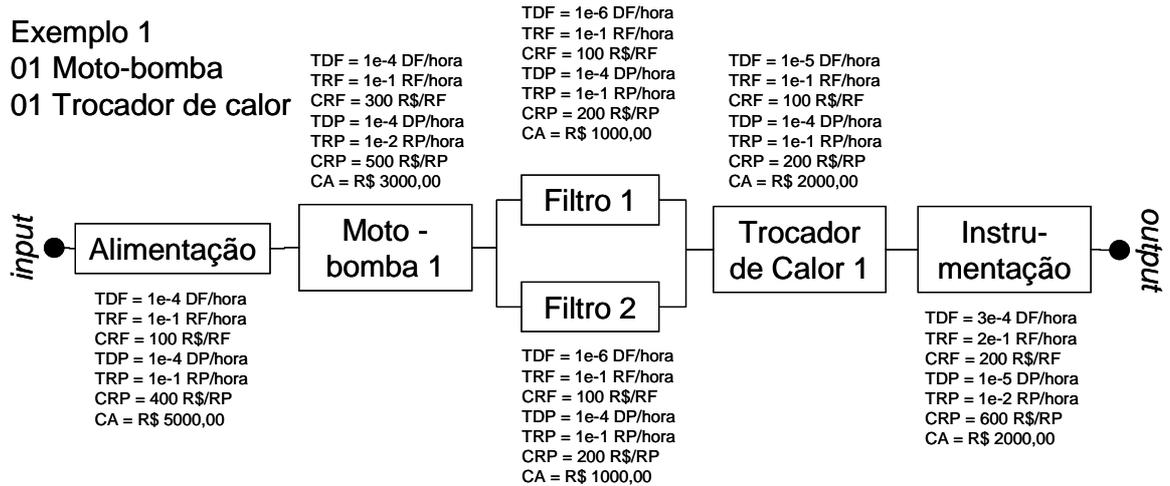
### 6.1.3. Diagramas de Blocos e Árvores de Sucesso

Neste Estudo de Caso serão apresentadas 05 (cinco) configurações diferentes para o sistema, as quais possuem desempenho e custo de aquisição variável de acordo com cada configuração.

Os parâmetros de entrada para cada caso foram estabelecidos considerando desempenho médio de sistemas similares e não refletem nenhum sistema real.

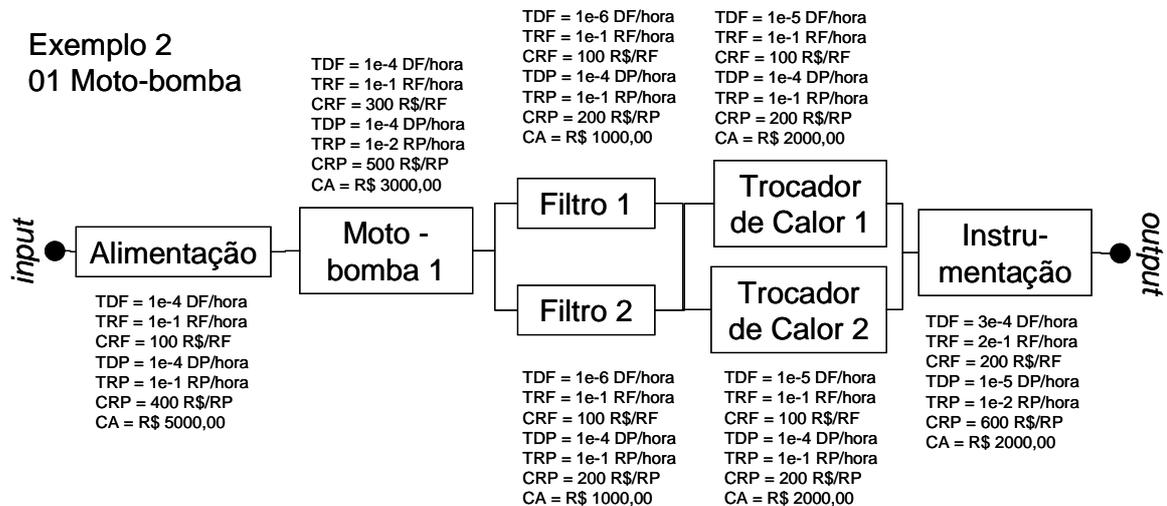
As configurações (ou topologias) da disposição dos equipamentos são apresentadas a seguir:

1. Sistema de Circulação composto de 01 moto-bomba, 02 filtros (01 filtro duplo), 01 trocador de calor, 01 fonte de alimentação e 01 conjunto de instrumentos de proteção e controle. O sistema está sujeito a uma sistemática padrão de Operação e Manutenção;



**Figura 26 - Exemplo 6.1 – 01 ALM, 01 MB, 02 FIL, 01 TC e 01 INS**

2. Sistema de Circulação composto de 01 moto-bomba, 02 filtros (01 filtro duplo), 02 trocadores de calor, 01 fonte de alimentação e 01 conjunto de instrumentos de proteção e controle. O sistema está sujeito a uma sistemática padrão de Operação e Manutenção;



**Figura 27 - Exemplo 6.2 – 01 ALM, 01 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS**

3. Sistema de Circulação composto de 02 moto-bombas, 02 filtros (01 filtro duplo), 02 trocadores de calor, 01 fonte de alimentação e 01 conjunto de instrumentos de proteção e controle. O sistema está sujeito a uma sistemática padrão de Operação e Manutenção;

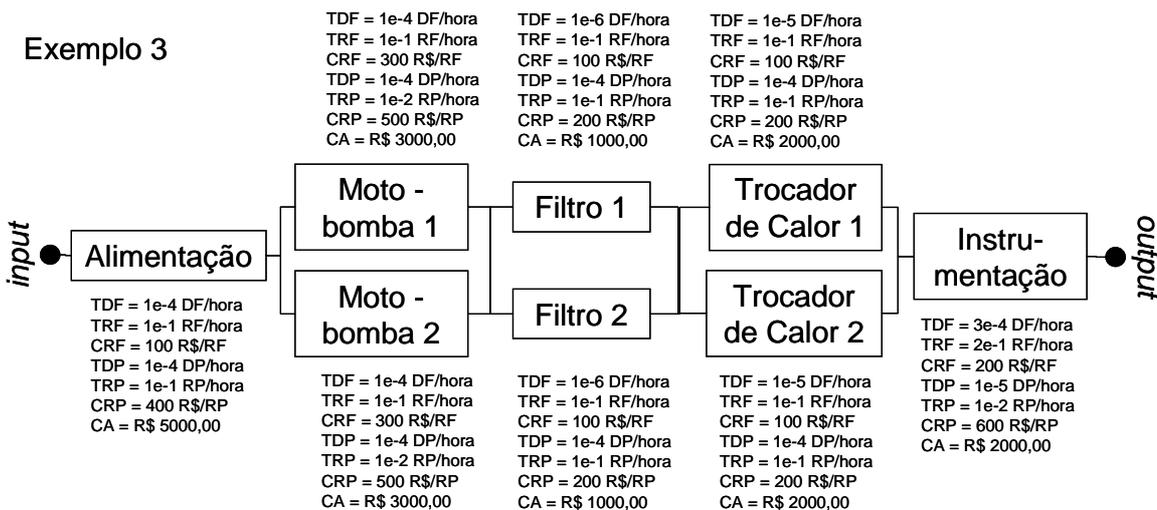


Figura 28 - Exemplo 6.3 – 01 ALM, 02 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS

4. Sistema de Circulação composto de 03 moto-bombas, 02 filtros (01 filtro duplo), 02 trocadores de calor, 01 fonte de alimentação e 01 conjunto de instrumentos de proteção e controle. O sistema está sujeito a uma sistemática padrão de Operação e Manutenção;

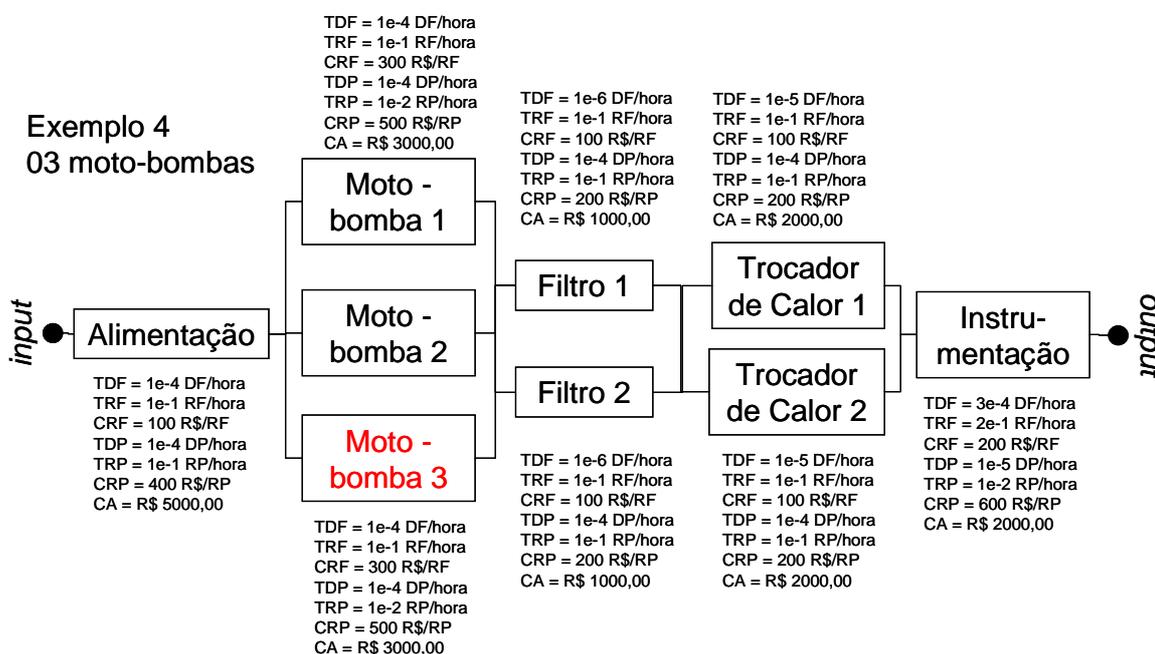
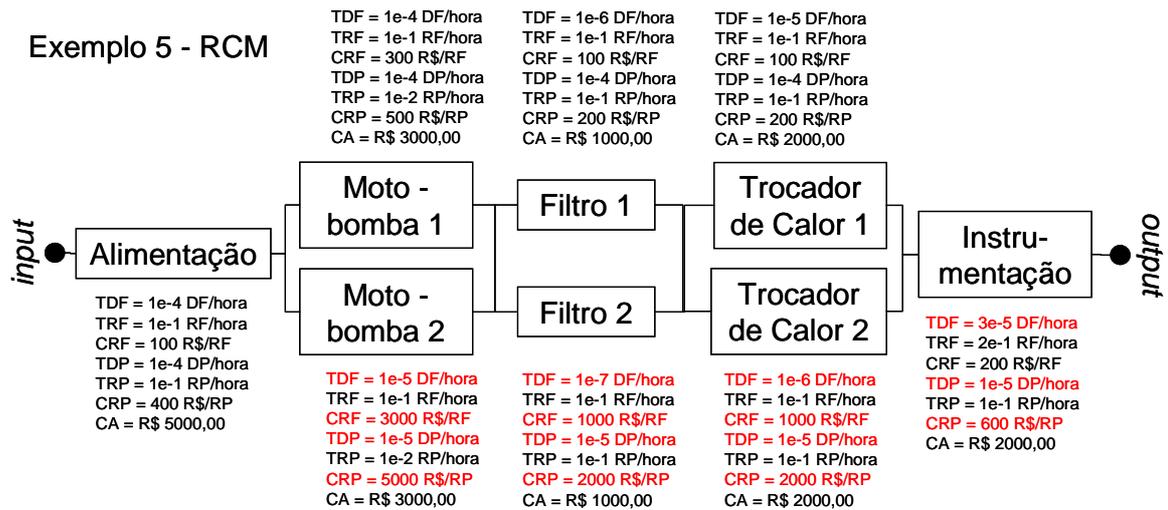


Figura 29 - Exemplo 6.4 – 01 ALM, 03 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS

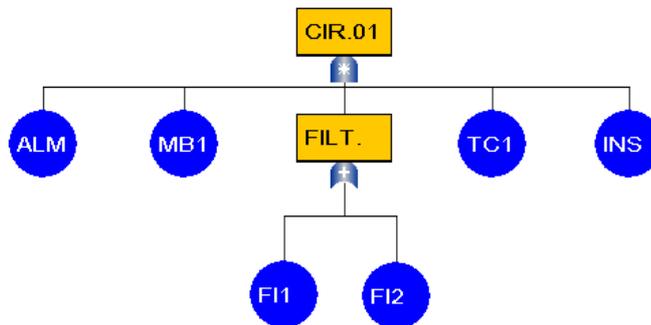
5. Sistema de Circulação composto de 01 moto-bomba, 02 filtros (01 filtro duplo), 01 trocador de calor, 01 fonte de alimentação e 01 conjunto de instrumentos de proteção e controle. O sistema está sujeito a sistemática de Operação e Manutenção prescrita pela RCM – Reliability Centered Maintenance.



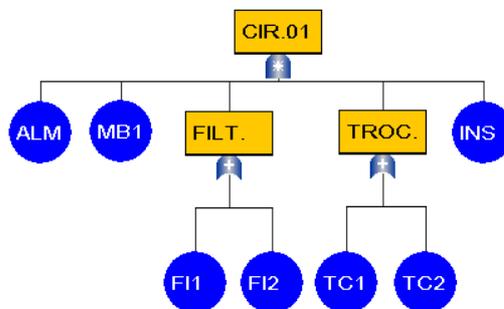
**Figura 30 - Exemplo 6.5 – 01 ALM, 02 MB, 02 FIL, 02 TC e 01 INS – RCM**

Os Diagramas de Blocos foram convertidos para o formato de Árvore de Sucesso, as quais preservam as características das topologias estudadas. Os parâmetros apresentados foram inseridos no Sistema A<sup>2</sup> para a avaliação e comparação das métricas e indicadores que caracterizam o desempenho dos sistemas.

São apresentadas as Árvore de Sucesso para cada um dos casos citados:



**Figura 31 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.1.**



**Figura 32 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.2.**

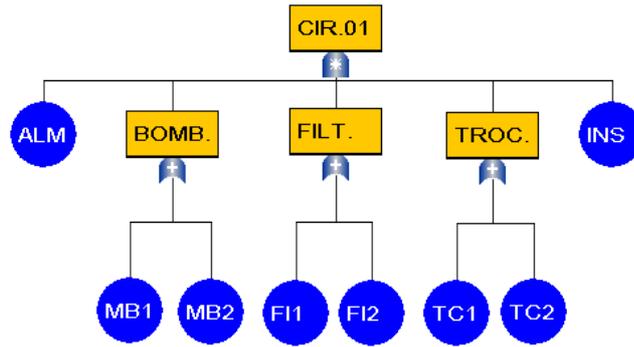


Figura 33 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.3.

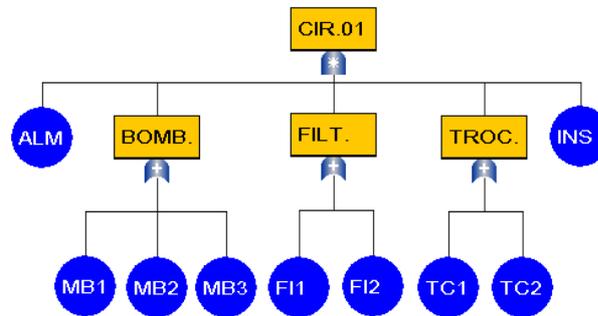


Figura 34 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.4.

Descrição do parâmetro	Valor atribuído
[Escala] Manut. Forçada	
[Forma] Manut. Forçada	
[Escala] Reparo Forçado	
[Forma] Reparo Forçado	
Custo de Manut. Forçada	
[Escala] Manut. Programada	
[Forma] Manut. Programada	
[Escala] Reparo Programado	
[Forma] Reparo Programado	
Custo de Manut. Programada	
Periodicidade Preventiva	10000.0
Duração Média Preventiva	0.0
Custo da Manut. Preventiva	0.0
Custo de Aquisição	7000.0
Fator de Serviço	1.0

Figura 35 - Árvore de Sucesso para o Exemplo 6.5, apresentado na tela do Sistema A<sup>2</sup>.

#### 6.1.4. Parâmetros simulados

Após a inserção dos dados, cada exemplo foi simulado para um horizonte de análise de 05 (cinco) anos, ou 43.800 horas.

Os resultados da simulação serviram como base para a predição das perdas com faturamento devido às indisponibilidades e dos custos de manutenção.

Os resultados foram exportados para o MS-Excel e organizados em uma tabela para fins de registro e facilidade de comparação.

Segue a tabela utilizada na comparação dos resultados:

**Tabela 6 – Estudo de Caso 1 – Comparativo entre os resultados das diferentes topologias.**

<b>Métricas</b>	<b>Exemplo 1</b>	<b>Exemplo 2</b>	<b>Exemplo 3</b>	<b>Exemplo 4</b>	<b>Exemplo 5</b>	<b>Unidade</b>
Disponibilidade Média	98,36%	98,47%	99,54%	99,55%	99,77%	[h/h]
Indisponibilidade Forçada Média	0,35%	0,35%	0,25%	0,25%	0,11%	[h/h]
Indisponibilidade Programada Média	1,29%	1,19%	0,21%	0,20%	0,11%	[h/h]
Taxa de Desligamento Forçado Médio	4,54	4,48	4,29	4,21	1,23	[ndf/ano]
Taxa de Reparo Forçado Médio	0,14	0,15	0,19	0,19	0,12	[ndf/hora]
Taxa de Desligamento Programado Médio	3,51	3,37	3,19	3,11	1,23	[ndp/ano]
Taxa de Reparo Programado Médio	0,03	0,03	0,17	0,18	0,13	[ndp/hora]
Número de Desligamentos Forçados	22,34	22,04	21,35	20,95	6,14	[ndf]
Número de Desligamentos Programados	17,27	16,58	15,90	15,50	6,11	[ndp]
Tempo de Indisponibilidade Forçada	155,30	151,12	109,65	109,16	50,32	[horas]
Tempo de Indisponibilidade Programada	562,99	519,83	92,04	87,43	48,56	[horas]
Tempo de Indisponibilidade	718,29	670,95	201,69	196,59	98,88	[horas]
Tempo Disponível	43.081,71	43.129,05	43.598,31	43.603,41	43.701,12	[horas]
Tempo em Serviço	43.081,71	43.129,05	43.598,31	43.603,41	43.701,12	[horas]
Tempo Total	43.800,00	43.800,00	43.800,00	43.800,00	43.800,00	[horas]
Custo de Manutenção Programada	6.832,80	7.708,80	9.898,80	12.088,80	9.898,80	[R\$]
Custo de Manutenção Forçada	4.476,36	4.563,96	5.877,96	7.191,96	3.512,76	[R\$]
Custo de Manutenção Total	11.309,16	12.272,76	15.776,76	19.280,76	13.411,56	[R\$]
Custo de Aquisição	14.000,00	16.000,00	19.000,00	22.000,00	19.000,00	[R\$]
Instante inicial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	[horas]
Instante final	43.800,00	43.800,00	43.800,00	43.800,00	43.800,00	[horas]
Perda por hora indisponível	3.375,00	3.375,00	3.375,00	3.375,00	3.375,00	[R\$]
Perdas por indisponibilidades	2.424.223,53	2.264.458,42	680.713,65	663.482,01	333.729,31	[R\$]
Custos + Perdas totais (não descontado)	2.449.532,69	2.292.731,18	715.490,41	704.762,77	366.140,87	[R\$]

Obs.: Foram omitidos os resultados simulados relativos à Manutenção Preventiva.

### **6.1.5. Resultado comparativo**

A evolução dos resultados de Disponibilidade e Número de Desligamentos versus Custo de Aquisição é observado na linha de “Custo + Perdas totais”, onde se pode observar que os Exemplos 6.1 e 6.2 apresentam valores acima de R\$ 2.000.000,00 em um horizonte de 05 (cinco) anos.

No Exemplo 6.3, devido às redundâncias inseridas, apresenta valor de custos e perdas inferior a R\$ 1.000.000,00, apresentando economia relativa considerável em relação aos exemplos anteriores.

Da comparação entre os Exemplos 6.3 e 6.4 se pode perceber que existe uma melhoria do resultado econômico, porém de menor dimensão. O acréscimo de uma 3ª (terceira) moto-bomba no sistema aumenta o custo de aquisição e manutenção, porém, reduz as perdas por indisponibilidade.

Vale ressaltar que os valores dos parâmetros de desempenho não refletem sistemas reais e que as perdas por indisponibilidade apresentadas na análise não são lineares para o processo de Geração de Energia.

O Exemplo 6.5 apresenta a expectativa de melhora do desempenho do sistema sob a ótica do RCM, a qual busca garantir o funcionamento adequado do sistema por meio de uma série de técnicas, as quais incluem a preservação e testes periódicos dos sistemas de proteção e controle.

Concluimos que o modelo apresenta adequadamente os resultados esperados de desempenho de diferentes configurações para um mesmo sistema e, ainda, permite simular os impactos de alterações na sistemática de Operação e Manutenção, as quais podem desencadear custos de manutenção e perdas por indisponibilidade menores que a simples inclusão de redundâncias adicionais.

## 6.2 Estudo de Caso 2 – Sistemas Principais de uma UGH

Com a finalidade de validar o modelo proposto foi estudado um caso prático em 01 (uma) unidade geradora da UHE Tucuruí, com características médias de frequência e duração das intervenções de manutenção, caracterizando o desempenho médio de uma unidade geradora.

### 6.2.1. Descrição dos Sistemas

Toda unidade geradora hidráulica possui determinadas características comuns ao correto exercício da função geração de energia.

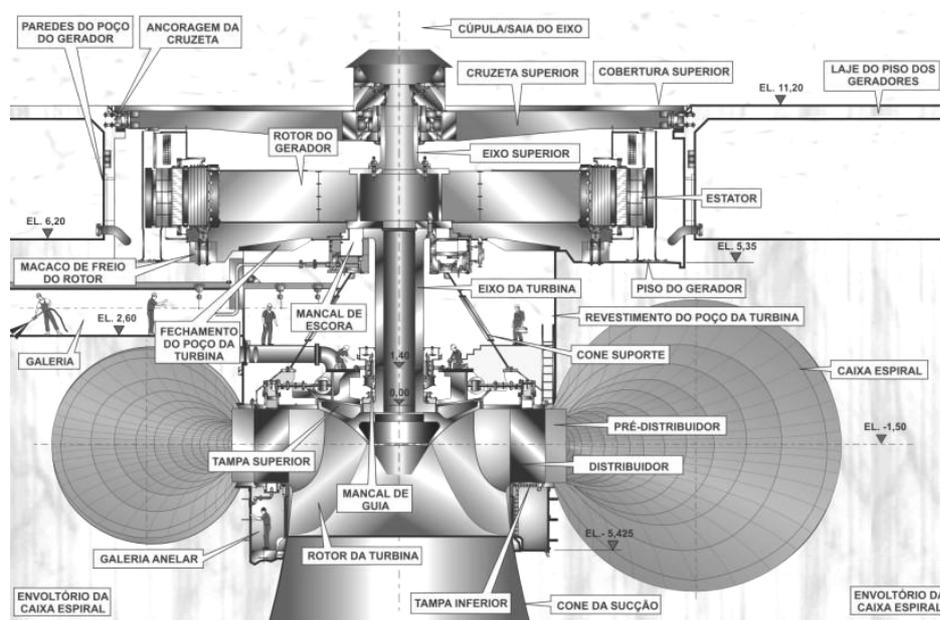


Figura 36 - Corte de Unidade Geradora Hidráulica da UHE Tucuruí.

#### 6.2.1.1. Sistema da Turbina

O Sistema da Turbina é responsável por garantir que a energia cinética do fluxo de água seja convertida em energia mecânica no eixo de forma segura e eficiente. É composto pelos seguintes equipamentos:

- Mancal de Escora
- Mancal Guia da Turbina
- Sistema de Estabilização
- Sistema de Vedação do Eixo da Turbina
- Sistema do Distribuidor
- Turbina Hidráulica

### ***6.2.1.2.Sistema de Adução e Descarga***

O Sistema de Adução e Descarga é responsável pela captação do fluxo de água a montante com energia potencial e converter-la em energia cinética.

Após a passagem pela turbina a água é direcionada aos difusores e então para a jusante do rio.

O sistema é composto, principalmente, pelos seguintes equipamentos:

- Adução
- Comporta Tomada D'água
- Descarga

### ***6.2.1.3.Sistema de Controle***

O Sistema de Controle possui a função de ajustar os parâmetros produtivos de acordo com a necessidade do SIN, além de apresentar para a área de Operação os eventos ocorridos no sistema de supervisão e proteção.

O sistema é composto, principalmente, pelos seguintes equipamentos:

- Anunciador de Alarmes
- Relés Auxiliares/Temporizadores
- Unidade Digital de Controle

### ***6.2.1.4.Sistema de Medição***

O Sistema de Medição registra os valores de energia gerados e transmitidos para fins de faturamento da empresa.

É composto pelos seguintes equipamentos:

Indicadores Digitais

- Medidor Digital de Faturamento
- Medidor Digital de Grandezas Elétricas
- Transdutor de Potência
- Transdutor de Desequilíbrio de Excitação
- Transdutor de Perda de Carga na Grade
- Transdutor de Pressão na Caixa Espiral
- Transdutor de Tensão para Corrente de Campo
- Transdutor de Vazão Turbinada

#### ***6.2.1.5.Sistema de Proteção***

O Sistema de Proteção detém função fundamental na detecção e atuação de alarmes e comandos de desligamento automático devido às condições operativas danosas aos equipamentos da unidade.

Os eventos de atuação de alarmes e comandos automáticos são enviados e registrados no Sistema de Controle para posterior análise e solução do problema.

O Sistema de Proteção é composto dos seguintes equipamentos:

- Proteção Digital Primária
- Proteção Digital Secundária
- Relé de Mínima Corrente no Rotor
- Relé de Sincronismo
- Relé Sincronizador
- Relé de Sobrecorrente no Rotor
- Relé de Sobretemperatura no Gerador
- Relé de Sobretensão no Regulador
- Unidade de Aquisição Digital

#### ***6.2.1.6.Sistema de Regulação de Velocidade***

O SIN trabalha com uma frequência da rede básica de 60 Hz que foi definida por legislação pertinente. A frequência de geração de energia na forma alternada depende da velocidade com que os pólos do rotor do gerador passam pelos barramentos. Tal velocidade tem de ser constante para que a frequência seja constante.

O Sistema de Regulação de Velocidade é responsável por manter constante a velocidade de giro do rotor do Gerador por meio do controle do fluxo de água direcionado para a turbina em oposição à resistência magnética do Gerador sob determinada excitação.

É composto, de forma superficial, pelos seguintes equipamentos:

- Regulador Eletrônico
- Regulador Hidráulico

#### ***6.2.1.7.Sistema do Gerador***

O Sistema do Gerador possui a finalidade de transformar a energia mecânica do eixo em energia elétrica, por meio da variação constante do fluxo magnético no bobinado do Estator devido ao movimento dos Pólos do Rotor.

O Gerador Elétrico é composto por pólos que recebem uma excitação para a formação do campo magnético. Tal excitação deve ser controlada para garantir que a tensão gerada nos terminais de saída do Estator estará dentro dos parâmetros desejados.

O Sistema do Gerador é composto pelos seguintes equipamentos:

- Armário de Excitação
- Armário do Transformador de Excitação
- Barramento de Saída 13,8 kV
- Cabos de Saída 13,8 kV
- Cubículo de Neutro
- Cubículo de Surtos
- Gerador Elétrico
- Mancal Guia do Gerador
- Regulador de Tensão
- Sistema de Frenagem e Levantamento

#### ***6.2.1.8.Sistema do Transformador 500 kV***

O Sistema do Transformador possui a função de elevar a tensão gerada no Gerador Elétrico de 13,8 kV para 500 kV a determinados valores de corrente elétrica que resultarão na Potência Ativa gerada.

O sistema é composto pelos seguintes equipamentos:

- Bucha 500 kV fase A
- Bucha 500 kV fase B
- Bucha 500 kV fase V
- Transformador de Potência 500 kV

#### ***6.2.1.9.Sistemas Auxiliares da Unidade***

Os Sistemas Auxiliares da Unidade possuem diversas finalidades, sendo as principais o controle das temperaturas, a alimentação elétrica dos painéis de controle, alimentação dos sensores de pressão e fluxo e alimentação das moto-bombas, moto-compressores e mecanismos de manobra.

Resumidamente, os principais sistemas auxiliares são:

- Centro de Carga da Unidade
- Disjuntor 13,8 kV
- Reator Limitador 13,8 kV

- Sistema de Resfriamento da Unidade
- Transformador Regulador 13,8 kV

#### 6.2.1.10. Subestação Blindada

A Subestação Blindada é responsável pela conexão entre os terminais de alta tensão do Transformador com a Linha de Transmissão.

Este equipamento envolve os condutores em potencial de 500 kV com pressão de gás de Hexafluoreto de Enxofre (SF6) por meio de compartimentos.

Este sistema é composto pelos seguintes equipamentos:

- Chave de Aterramento 500 kV
- Compartimento "D" SF6 500 kV
- Compartimento "M" SF6 500 kV
- Disjuntor 500 kV
- Seccionadora 500 kV

De forma geral, estes são os sistemas e equipamentos que compõem uma unidade geradora hidráulica. Os níveis de tensão citados dependem do projeto da unidade.

#### 6.2.2. Diagrama de Blocos (Árvore de Sucesso)

Analisando uma Usina Hidrelétrica como um todo se verifica que a existência da chamada “Reserva Girante” a qual, por si, já denota certo nível de redundância.

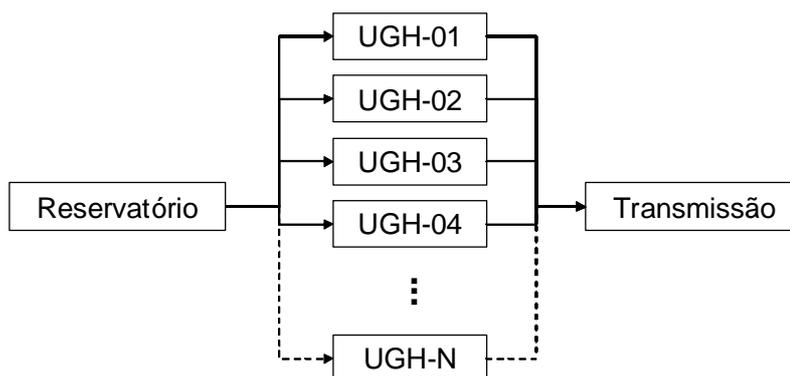
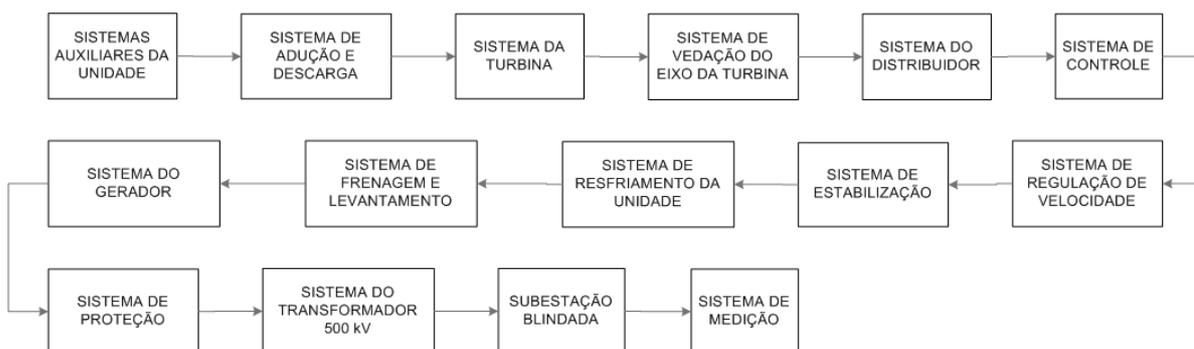


Figura 37 - RBD esquemático de uma UHE com UGH em paralelo.

As UGH de uma usina hidrelétrica se comportam como estruturas lógicas em paralelo, garantido robustez, flexibilidade operacional e aumentando a confiabilidade da instalação.

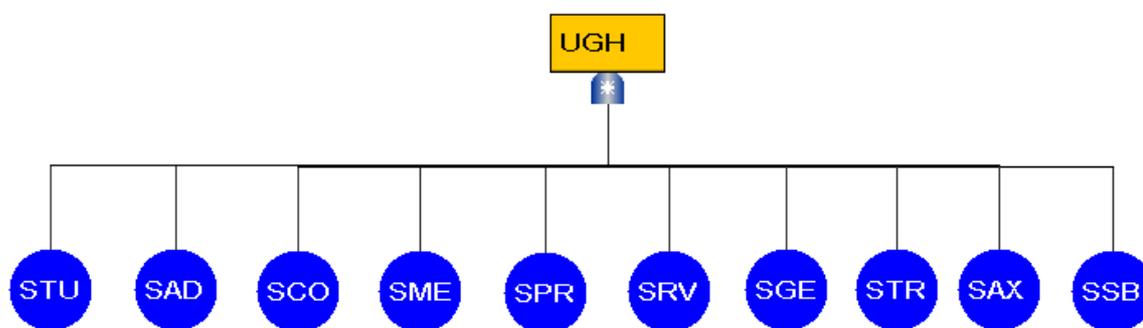
Métodos de modelagem como o  $k$ -out- $N$  podem ser empregados para esta configuração, sendo o problema reduzido à modelagem interna dos blocos das UGH.

De forma geral, uma Unidade Geradora Hidráulica é um sistema em série sem redundâncias de alto nível, sendo que para alguns sistemas são inseridas redundâncias de baixo nível como a inclusão de moto-bombas em *stand-by*, sensores de grandezas complementares como pressão e fluxo e alternativas de alimentação básica para partida da unidade até o auto-suprimento.



**Figura 38 - Diagrama de Blocos de Confiabilidade da UGH.**

O Diagrama de Blocos é então convertido na Árvore de Sucesso para a UGH. Devido ao diagrama estar configurado em série a árvore será dotada de apenas 01 (uma) porta lógica *E* recebendo todos os nós representativos dos equipamentos.



**Figura 39 - Árvore de Sucesso da UGH.**

Legenda das abreviaturas:

- UGH* - Unidade Geradora Hidráulica
- STU* - Sistema da Turbina
- SAD* - Sistema de Adução e Descarga
- SCO* - Sistema de Controle
- SME* - Sistema de Medição
- SPR* - Sistema de Proteção
- SRV* - Sistema de Regulação de Velocidade

<i>SGE</i>	- Sistema do Gerador
<i>STR</i>	- Sistema do Transformador 500 kV
<i>SAX</i>	- Sistemas Auxiliares
<i>SSB</i>	- Subestação Blindada

### **6.2.3. Planejamento da Manutenção**

O Planejamento da Manutenção para usinas hidrelétricas segue orientações descritas nos Procedimentos de Rede do ONS, além de normas internas dos agentes de geração.

As unidades geradoras necessitam de intervenções complexas devido à concepção do processo de geração ser em sua maior parte embutido no concreto ou enclausurado em compartimentos pressurizados.

Grandes intervenções são planejadas para que seja possível realizar inspeções em partes dos sistemas que são inacessíveis sem tais procedimentos.

Para fins desta modelagem foram consideradas apenas atividades que necessitam desligar a unidade geradora, gerando indisponibilidade.

Para a unidade geradora considerada foram estabelecidos parâmetros para a Manutenção Preventiva conforme realizado. A periodicidade praticada é de 05 (cinco) anos com uma duração média de 720 horas.

Como atividade de Manutenção Preventiva de curta duração é realizada uma inspeção de integridade do Anel Coletor, considerado um componente do Gerador Elétrico. A referida inspeção é trimestral com duração média de 4 (quatro) horas.

Considerando 8760 horas para 01 (um) ano padrão, pode-se afirmar que para um período de 05 (cinco) anos teremos 1,79% de indisponibilidade por Manutenção Preventiva.

### **6.2.4. Disponibilidade Alcançada**

É apresentada a indisponibilidade forçada alcançada das UGH estudadas utilizando os valores de *TEIF* e *TEIP*.

Devido à política de confidencialidade de dados estratégicos da empresa estudada foram estabelecidas médias dos indicadores analisados no período de 2006 a 2010, totalizando um período de 60 meses.

Da análise obtivemos valores médios de  $TEIF = 2,68698\%$ ,  $TEIP = 2,90680\%$  e  $ID = 94,48433\%$ . Da subtração dos valores das taxas de indisponibilidade, obtêm-se uma disponibilidade média de  $94,40622\%$ , que se apresenta diferente do indicador  $ID$ , que possui fórmula de cálculo específica.

Considerando que do  $TEIP$  incluem-se as indisponibilidades programadas de caráter preventivo e corretivo, obtêm-se pela análise do planejamento da manutenção os valores de indisponibilidade por manutenção programada corretiva equivalente a  $1,11308\%$ .

Espera-se que o modelo forneça resultados compatíveis com os valores calculados para as 03 (três) indisponibilidades e, portanto, para o valor da disponibilidade.

A tabela abaixo apresenta dados do Setor Elétrico Brasileiro – SEB, a qual apresenta valor médio de  $89,56\%$  de disponibilidade para unidades geradoras do mesmo porte das UGH da UHE Tucuruí.

**Tabela 7 – Agrupamento de UGH por potência para comparativo de indicadores.**

FAIXA DE POTÊNCIA HIDRÁULICA (MW)	POTÊNCIA INSTALADA (MW)	TAXA DE FALHA (f/uao)	HORAS DE REPARO (h)	TEMPO MÉDIO REPARO (h)	IND. H11 (%)	IND. H12 (%)	IND. TOTAL (%)	DISPON. (%)	IDADE MÉDIA (ano)
10 - 30	1123,90	4,22	7521,05	44,50	1,54	15,01	16,56	83,44	34,66
30,1 - 60	2527,85	4,97	14053,00	86,21	2,65	21,65	24,30	75,70	29,54
60,1 - 100	4304,30	4,33	6222,01	32,24	1,22	8,53	9,76	90,24	37,20
100,1 - 200	19437,11	2,34	19867,34	80,11	1,82	9,17	10,99	89,01	18,49
200,1 - 400	26379,20	2,48	10060,13	66,19	1,27	9,17	10,44	89,56	12,66
> 400	22411,00	1,50	2453,78	49,08	0,54	4,88	5,42	94,58	19,77
<b>TOTAL</b>	<b>76183,36</b>	<b>3,07</b>	<b>60177,31</b>	<b>61,72</b>	<b>1,24</b>	<b>8,37</b>	<b>9,62</b>	<b>90,38</b>	<b>23,41</b>

Fonte: ABRAGE – Análise Estatística de Desempenho de UGH – 2009.

### 6.2.5. Disponibilidade Modelada

A Árvore de Falhas completa de 01 (uma) UGH, da estratificação pela empresa estudada, possui um total de 1936 componentes, dos quais optou-se por manter um nível intermediário de sub-divisões para possibilitar o gerenciamento.

Para fins de apresentação acadêmica, a Árvore de Sucesso modelada contará apenas com os componentes que apresentaram falha nos últimos 03 anos, totalizando 128 componentes.

Foi realizada uma análise estatística dos dados de manutenções forçadas, programadas e preventivas, da qual se obteve as taxas de transições entre estados e as taxas de retorno ao estado disponível.

Realizada uma estimação dos custos de manutenção que será relevante para as próximas etapas do trabalho na melhoria do desempenho na dimensão econômico-financeira.

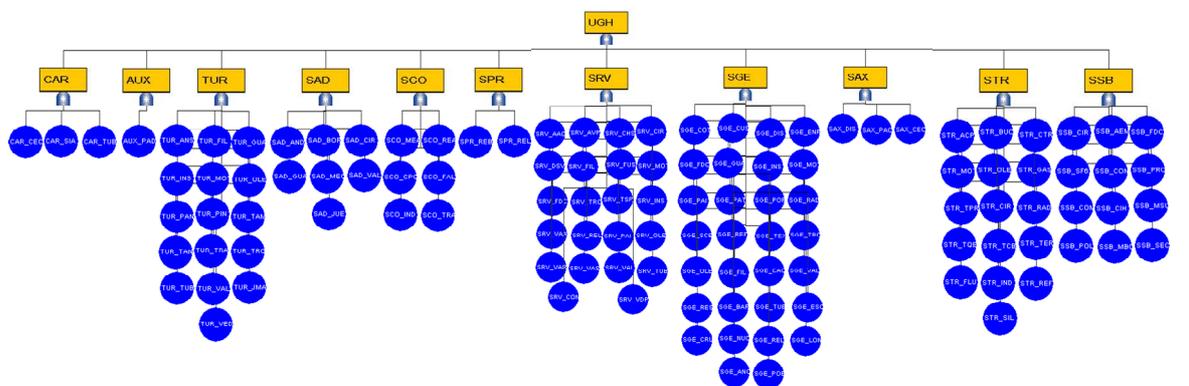
Segue a tabela resumida dos dados de entrada do modelo.

**Tabela 8 – Dados de entrada do modelo.**

Índex	Nome	Descrição	Tipo	Gerente	Taxa de Manutenção Forçada	Taxa de Reparo Forçado	Número de Manutenções Forçadas	Custo dos Reparos Forçados	Taxa de Manutenção Programada	Taxa de Reparo Programado	Número de Manutenções Programadas	Custo dos Reparos Programados	Periodicidade Preventiva	Duração Preventiva	Número de Manutenções Preventivas	Custo das Manutenções preventivas	Custo de Aquisição	Fatos de Serviço
0	UGH	Unidade Geradora Hidráulica	Porta E				5,78E+00				2,84E+00		4,38E+04	8,00E+02	2,00E-01	6,27E+05	8,00E+07	75,00%
1	CAR	Central de Injeção de Ar	Porta E	UGH			1,20E-01				2,63E-06		1,00E+04	0,00E+00	8,76E-01	0,00E+00	0,00E+00	100,00%
2	CAR_CEC	Comando e controle	Terminal	CAR	1,52E-06	1,50E+01	1,33E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
3	CAR_SIA	Sistema de Injeção de Ar	Terminal	CAR	6,09E-06	2,51E-01	5,34E-02	3,31E+04	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	2,29E+03						
4	CAR_TUB	Tubulações e válvulas	Terminal	CAR	6,09E-06	1,41E-01	5,34E-02	3,31E+04	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
5	AUX	Sistema Auxiliar 125 Vcc	Porta E	UGH			1,20E-01				1,42E-02		1,00E+04	0,00E+00	8,76E-01	0,00E+00	0,00E+00	100,00%
6	AUX_PAD	Painel de distribuição 125 Vcc	Terminal	AUX	1,37E-05	2,09E-01	1,20E-01	0,00E+00	1,62E-06	3,33E-01	1,42E-02	0,00E+00						
7	TUR	Sistema da Turbina	Porta E	UGH			8,67E-01				2,55E-01		1,00E+04	0,00E+00	8,76E-01	0,00E+00	0,00E+00	100,00%
8	TUR_ANS	Anel de Sincronismo	Terminal	TUR	1,83E-05	1,54E-02	1,60E-01	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	4,34E+02						
9	TUR_FIL	Filtro	Terminal	TUR	7,61E-06	5,42E-02	6,67E-02	3,24E+02	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
10	TUR_GUA	Guarnições	Terminal	TUR	9,13E-06	1,00E-02	8,00E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
11	TUR_INS	Instrumentação	Terminal	TUR	1,67E-05	2,45E-01	1,46E-01	4,92E+02	9,71E-06	1,11E-01	8,51E-02	1,85E+03						
12	TUR_MOT	Moto-bomba	Terminal	TUR	4,57E-06	9,01E-02	4,00E-02	2,44E+03	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	1,96E+02						
13	TUR_OLE	Óleo lubrificante	Terminal	TUR	1,52E-06	8,76E-02	1,33E-02	2,71E+04	6,47E-06	3,68E-02	5,67E-02	1,62E+03						
14	TUR_PAN	Painel elétrico	Terminal	TUR	1,52E-06	3,16E+00	1,33E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
15	TUR_PIN	Pino de cisalhamento	Terminal	TUR	1,22E-05	1,07E-02	1,07E-01	0,00E+00	6,47E-06	1,42E-02	5,67E-02	0,00E+00						
16	TUR_TAM	Tampa	Terminal	TUR	1,52E-06	8,57E+00	1,33E-02	2,60E+04	3,24E-06	4,01E-02	2,84E-02	2,60E+04						
17	TUR_TAN	Tanque	Terminal	TUR	3,04E-06	4,14E-01	2,66E-02	1,25E+02	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
18	TUR_TRA	Trava	Terminal	TUR	4,57E-06	1,99E-01	4,00E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
19	TUR_TRO	Trocador de calor	Terminal	TUR	3,04E-06	8,22E-01	2,66E-02	1,49E+03	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
⋮																		
111	SAX_DIS	Disjuntor	Terminal	SAX	4,57E-06	1,76E+00	4,00E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
112	SAX_PAC	Painel de alimentação	Terminal	SAX	1,52E-06	4,29E+00	1,33E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
113	STR	Sistema do Transformador	Porta E	UGH			4,80E-01				1,12E+00		1,00E+04	0,00E+00	8,76E-01	0,00E+00	0,00E+00	100,00%
114	STR_ACP	Armário de comando principal	Terminal	STR	1,52E-06	8,00E-01	1,33E-02	6,03E+02	1,62E-06	3,38E-02	1,42E-02	0,00E+00						
115	STR_BUC	Bucha	Terminal	STR	4,57E-06	2,66E-03	4,00E-02	5,09E+04	6,42E-06	1,42E-02	5,62E-02	3,76E+03						
116	STR_CIR	Circuito de comando	Terminal	STR	1,52E-06	7,73E-02	1,33E-02	0,00E+00	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
117	STR_CTR	Conexões térmicas	Terminal	STR	1,52E-06	1,55E-03	1,33E-02	1,29E+04	1,62E-06	2,16E-02	1,42E-02	0,00E+00						
118	STR_MOT	Moto-bomba	Terminal	STR	1,52E-06	2,44E-01	1,33E-02	1,07E+04	1,29E-05	1,35E-02	1,13E-01	9,44E+03						
119	STR_OLE	Óleo isolante	Terminal	STR	1,67E-05	9,09E-03	1,46E-01	1,29E+05	4,85E-06	1,03E-03	4,25E-02	1,76E+04						
120	STR_RAD	Radiadores	Terminal	STR	1,07E-05	9,62E-02	9,37E-02	2,29E+03	2,43E-05	1,64E-02	2,13E-01	1,43E+03						
121	STR_GAS	Relé de gás	Terminal	STR	4,57E-06	3,00E-02	4,00E-02	2,43E+03	1,62E-06	4,46E-01	1,42E-02	8,36E+02						
122	STR_TPR	Tanque principal	Terminal	STR	3,04E-06	4,97E-03	2,66E-02	1,11E+05	9,71E-06	1,21E-03	8,51E-02	1,61E+04						
123	STR_TCB	TC de bucha	Terminal	STR	6,09E-06	2,20E-02	5,34E-02	1,11E+03	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00						
124	STR_TER	Termômetros	Terminal	STR	3,04E-06	3,75E-01	2,66E-02	3,17E+03	1,13E-05	4,03E-01	9,90E-02	0,00E+00						
125	STR_TOE	Tanque de expansão	Terminal	STR	1,00E-10	1,00E-02	8,76E-07	0,00E+00	1,62E-06	1,30E-02	1,42E-02	3,76E+03						
126	STR_REF	Relé de fluxo	Terminal	STR	1,00E-10	1,00E-01	8,76E-07	0,00E+00	4,85E-06	3,33E-01	4,25E-02	0,00E+00						
127	STR_IND	Indicador de nível	Terminal	STR	1,00E-10	1,00E-01	8,76E-07	2,83E+02	6,47E-06	1,25E-01	5,67E-02	7,99E+02						
128	STR_FLU	Filostatos	Terminal	STR	1,00E-10	1,00E-01	8,76E-07	1,29E+04	3,88E-05	1,21E-01	3,40E-01	0,00E+00						
129	STR_SIL	Silica gel	Terminal	STR	1,00E-10	1,00E-01	8,76E-07	7,61E+02	1,62E-06	1,25E-01	1,42E-02	7,61E+02						

Os dados foram inseridos no sistema A<sup>2</sup> por meio da Árvore de Sucesso de uma UGH imaginária.

A Árvore de Sucesso é apresentada na figura abaixo, composta de 11 sistemas e os 128 componentes modelados.



**Figura 40 - Árvore de Sucesso da UGH modelada.**

### 6.2.6. Validação dos Resultados

Como respostas do modelo são esperados os principais indicadores de desempenho do processo produtivo estudado, que no caso é o processo de Geração de Energia de base hidráulica.

Estes indicadores são base do processo de tomada de decisão da Manutenção e do processo de especificação de novos equipamentos e sistemas, que poderão melhorar, ou não, o desempenho geral do sistema.

**Tabela 9 – Resposta do modelo (indicadores e métricas)**

Indicador	Valor	Unidade
Disponibilidade Média	94,40569%	[h/h]
Indisponibilidade Forçada Média	2,68697%	[h/h]
Indisponibilidade Programada Média	1,11362%	[h/h]
Indisponibilidade Preventiva Média	1,79372%	[h/h]
Taxa de Desligamento Forçado Médio	9,143E-04	[ndf/ano]
Tempo Médio entre Desligamentos Forçados	1093,73	[horas/ndf]
Taxa de Reparo Forçado Médio	3,212E-02	[ndf/hora]
Tempo Médio de Reparo Forçado	31,13	[horas/ndf]
Taxa de Desligamento Programado Médio	4,491E-04	[ndp/ano]
Tempo Médio entre Desligamentos Programados	2226,70	[horas/ndp]
Taxa de Reparo Programado Médio	3,807E-02	[ndp/hora]
Tempo Médio de Reparo Programado	26,27	[horas/ndp]
Número de Desligamentos Forçados	28,35	[ndf]
Número de Desligamentos Programados	13,93	[ndp]
Tempo de Indisponibilidade Forçada	882,67	[horas]
Tempo de Indisponibilidade Programada	365,82	[horas]
Tempo de Indisponibilidade Preventiva	589,24	[horas]
Tempo de Indisponibilidade	1837,73	[horas]
Tempo Disponível	41349,69	[horas]
Tempo em Serviço	31012,27	[horas]
Tempo Total	43800,00	[horas]
Custo de Manutenção Programada	R\$ 79.146,66	[R\$]
Custo de Manutenção Forçada	R\$ 694.095,55	[R\$]
Custo de Manutenção Preventiva	R\$ 615.942,41	[R\$]
Custo de Manutenção Total	R\$ 1.389.184,62	[R\$]
Custo de Aquisição	R\$ 80.000.000,00	[R\$]
Instante inicial	0,00	[horas]
Instante final	43800,00	[horas]

O tempo de simulação escolhido foi de 43.800 horas, ou 05 (cinco) anos. Este período completo é relevante, pois fecha o período da média móvel do indicador *ID*.

Para a Disponibilidade e as Indisponibilidades foi escolhida a resolução de 05 (cinco) casas decimais para a apreciação dos erros do modelo. São apresentados, então, um total de 07 (sete) algarismos significativos.

Os analistas e projetistas poderão, eventualmente, necessitar deste nível de precisão, mas entende-se que normalmente a necessidade deve envolver 04 (quatro) algarismos significativos.

A tabela abaixo apresenta o resultado comparativo dos valores históricos levantados e os valores simulados por meio do modelo.

**Tabela 10 – Erro percentual comparado Histórico x Modelo.**

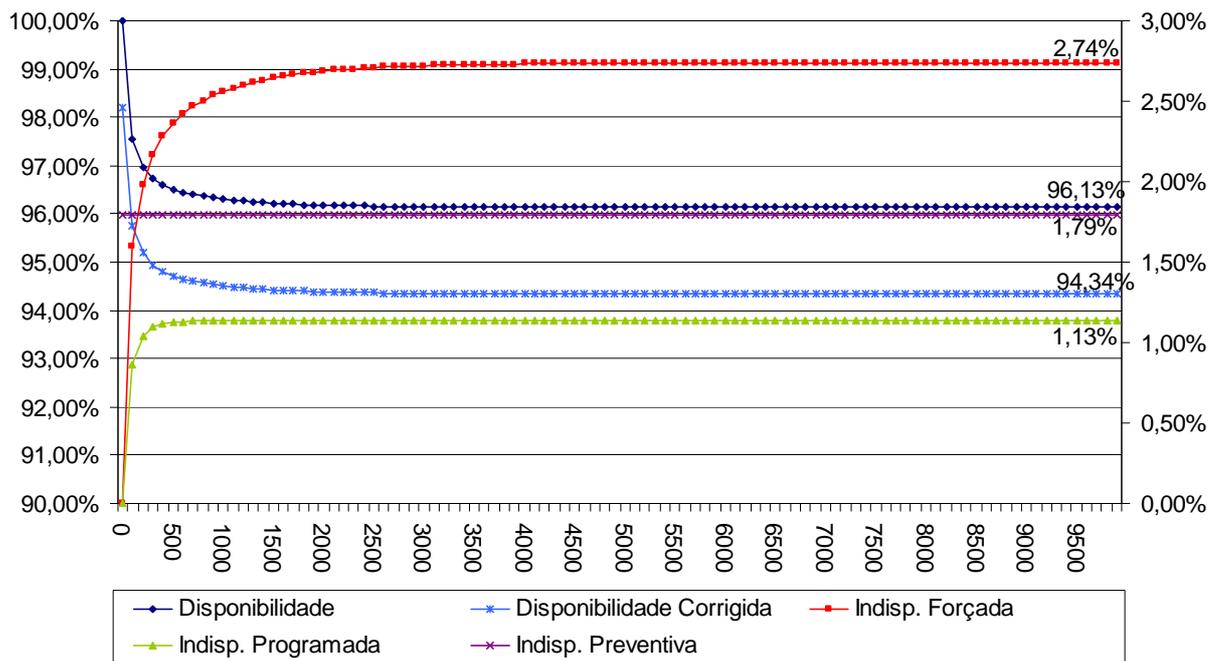
<b>Indicador</b>	<b>Histórico</b>	<b>Modelo</b>	<b>Erro%</b>
Disponibilidade	94,406220%	94,405693%	0,00056%
Indisponibilidade Forçada Média	2,686980%	2,686969%	0,00043%
Indisponibilidade Programada Média	1,113080%	1,113616%	0,04815%
Indisponibilidade Preventiva Média	1,793720%	1,793722%	0,00011%
		<b>Erro Médio</b>	<b>0,02%</b>

Obs.: Acrescida 01 casa decimal nos resultados para a verificação do Erro Percentual.

O maior erro percentual encontrado foi menor que 0,5% na simulação da indisponibilidade programada e o erro médio para as 03 (três) indisponibilidades foi de 0,02%.

Apesar de um modelo analítico apresentar resultado exato, tal resultado depende dos dados entrados, os quais são inseridos manualmente pelos executantes dos serviços de manutenção e se configuram ponto de inclusão de informações incorretas visto que trabalha com 02 (dois) Sistemas de Informação distintos.

É apresentado abaixo um gráfico com a evolução dos valores instantâneos da Disponibilidade e demais estados do sistema. O horizonte apresentado no gráfico é de 10.000 horas.



**Gráfico 5 - Evolução dinâmica da Disponibilidade e demais estados do sistema.**

### 6.2.7. Análise de Sensibilidade

A Análise de Sensibilidade se caracteriza pela elaboração de hipóteses a respeito do desempenho ou disposição dos equipamentos e sistemas e a verificação do impacto de tais hipóteses nos resultados do modelo.

Para esta análise se considera a verificação de tendência em 01 (um) componente do sistema e após a simulação se comparam os resultados para identificação dos impactos nos resultados.

Foi atribuído um valor hipotético de  $\beta_f = 1,10$  para o fator de forma da taxa de manutenção forçada do componente *Escovas do Sistema do Gerador*, mantendo-se os mesmos valores de tempos de reparo forçado.

Uma vez atribuído o valor hipotético do fator de forma se executa a rotina de resolução recursiva da Árvore de Disponibilidade obtendo os resultados apresentados para Tabela 11.

**Tabela 11 – Análise de sensibilidade do modelo.**

Indicador	Valor	Unidade
Disponibilidade Média	94,05621%	[h/h]
Indisponibilidade Forçada Média	3,04026%	[h/h]
Indisponibilidade Programada Média	1,10980%	[h/h]
Indisponibilidade Preventiva Média	1,79372%	[h/h]
Taxa de Desligamento Forçado Médio	1,059E-03	[ndf/ano]
Tempo Médio entre Desligamentos Forçados	944,14	[horas/ndf]
Taxa de Reparo Forçado Médio	3,277E-02	[ndf/hora]
Tempo Médio de Reparo Forçado	30,52	[horas/ndf]
Taxa de Desligamento Programado Médio	4,508E-04	[ndp/ano]
Tempo Médio entre Desligamentos Programados	2218,46	[horas/ndp]
Taxa de Reparo Programado Médio	3,820E-02	[ndp/hora]
Tempo Médio de Reparo Programado	26,18	[horas/ndp]
Número de Desligamentos Forçados	32,73	[ndf]
Número de Desligamentos Programados	13,93	[ndp]
Tempo de Indisponibilidade Forçada	998,73	[horas]
Tempo de Indisponibilidade Programada	364,57	[horas]
Tempo de Indisponibilidade Preventiva	589,24	[horas]
Tempo de Indisponibilidade	1952,53	[horas]
Tempo Disponível	41196,62	[horas]
Tempo em Serviço	30897,47	[horas]
Tempo Total	43800,00	[horas]
Custo de Manutenção Programada	R\$ 79.146,66	[R\$]
Custo de Manutenção Forçada	R\$ 726.911,73	[R\$]
Custo de Manutenção Preventiva	R\$ 615.942,41	[R\$]
Custo de Manutenção Total	R\$ 1.422.000,80	[R\$]
Custo de Aquisição	R\$ 80.000.000,00	[R\$]
Instante inicial	0,00	[horas]
Instante final	43800,00	[horas]

Da análise dos resultados nota-se que houve redução da disponibilidade de 94,40% para 94,06%. Este fato deve-se ao aumento do número de intervenções no componente estudado que foi de 2,34 para 6,80.

**Tabela 12 - Resultado do NDF para o Sistema do Gerador com foco no componente “Escovas” com parâmetro de forma original.**

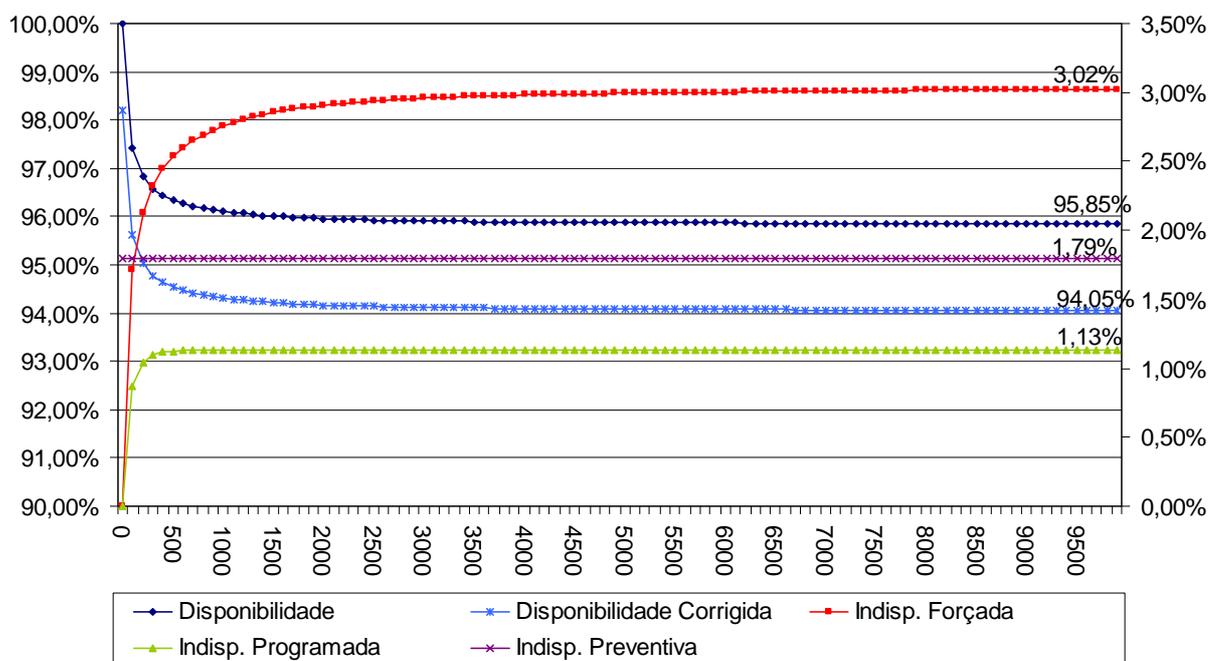
Genitor	Nome	Descrição	Total
SGE	SGE_ANC	Anel coletor	0,000
	SGE_BAR	Barramento	0,067
	SGE_CAC	Carcaça	0,067
	SGE_COT	Contator	0,067
	SGE_CRU	Cruzeta superior	0,000
	SGE_CUS	Cubículo de surto	0,067
	SGE_DIS	Disjuntor de campo	0,333
	SGE_ENR	Enrolamento	0,133
	<b>SGE_ESC</b>	<b>Escovas</b>	<b>2,335</b>
	SGE_FDC	Fim de curso	0,400
	SGE_FIL	Filtro	0,067
	SGE_GUA	Guarnições	0,067
	SGE_INS	Instrumentação	1,467
	SGE_LON	Lona de freio	0,000
	SGE_MOT	Moto-bomba	0,067
	SGE_NUC	Núcleo magnético	0,200
	SGE_OLE	Óleo lubrificante	0,067
	SGE_PAI	Painel elétrico	0,933
	SGE_PAT	Patins	0,067
	SGE_POE	Porta escovas	0,000
	SGE_POR	Ponte retificadora	0,333
	SGE_RAD	Radiadores	0,400
	SGE_REF	Sistema de resfriamento	0,666
	SGE_REL	Relé	0,067
	SGE_RES	Relé Saco	0,067
	SGE_SCE	Sistema de controle eletrônico	0,267
	SGE_TEX	Transformador de excitação	0,267
SGE_TRO	Trocador de calor	0,469	
SGE_TUB	Tubulações e conexões	0,333	
SGE_VAL	Válvulas	0,067	
Total geral			9,335

**Tabela 13 - Resultado do NDF para o Sistema do Gerador com foco no componente “Escovas” com parâmetro de forma alterado.**

Genitor	Nome	Descrição	Total
SGE	SGE_ANC	Anel coletor	0,000
	SGE_BAR	Barramento	0,067
	SGE_CAC	Carcaça	0,067
	SGE_COT	Contator	0,067
	SGE_CRU	Cruzeta superior	0,000
	SGE_CUS	Cubículo de surto	0,067
	SGE_DIS	Disjuntor de campo	0,333
	SGE_ENR	Enrolamento	0,133

Genitor	Nome	Descrição	Total
	<b>SGE_ESC</b>	<b>Escovas</b>	<b>6,797</b>
	SGE_FDC	Fim de curso	0,400
	SGE_FIL	Filtro	0,067
	SGE_GUA	Guarnições	0,067
	SGE_INS	Instrumentação	1,467
	SGE_LON	Lona de freio	0,000
	SGE_MOT	Moto-bomba	0,067
	SGE_NUC	Núcleo magnético	0,200
	SGE_OLE	Óleo lubrificante	0,067
	SGE_PAI	Painel elétrico	0,933
	SGE_PAT	Patins	0,067
	SGE_POE	Porta escovas	0,000
	SGE_POR	Ponte retificadora	0,333
	SGE_RAD	Radiadores	0,400
	SGE_REF	Sistema de resfriamento	0,666
	SGE_REL	Relé	0,067
	SGE_RES	Relé Saco	0,067
	SGE_SCE	Sistema de controle eletrônico	0,267
	SGE_TEX	Transformador de excitação	0,267
	SGE_TRO	Trocador de calor	0,469
	SGE_TUB	Tubulações e conexões	0,333
	SGE_VAL	Válvulas	0,067
SGE Total			13,797

É apresentado abaixo um gráfico com a evolução dos valores instantâneos da Disponibilidade e demais estados do sistema. O horizonte apresentado no gráfico é de 10.000 horas.



**Gráfico 6 - Evolução dinâmica da Disponibilidade na Análise de Sensibilidade**

## 7. Conclusões

Do objetivo geral de elaborar um modelo de disponibilidade operacional de uma unidade geradora hidráulica com vistas à melhoria do desempenho do referido sistema conclui-se que o objetivo foi atingido, sendo o método extensível a quaisquer sistemas produtivos.

Com relação aos objetivos específicos, se pode concluir, relativo ao Objetivo 1 que segundo o modelo, não há como otimizar a Disponibilidade visto que a curva tem comportamento monotônico até assintotar o valor da Disponibilidade de estado estacionário. Porém, é possível melhorar a Disponibilidade por meio da identificação dos gargalos (componentes com menor Disponibilidade) e atuação para sua eliminação. Os relatórios gerados pelo sistema  $A^2$  foram adequados para a identificação de tais gargalos.

Em situações extremas, as quais alguns componentes apresentem Fator de Forma para a Taxa de Desligamentos menor que 1 ( $\beta < 1$ ) e se mantendo as mesmas Taxas de Reparo, poderá haver melhoria da Disponibilidade ao longo do tempo. Este cenário caracteriza uma curva cujo decaimento exponencial da Disponibilidade próprio das Cadeias de Markov se contrapõe à tendência de aumento, gerando um ponto de Disponibilidade mínima, geralmente em torno do Tempo Médio até o Desligamento.

O Objetivo 2 foi estabelecido com sucesso, por meio da utilização de filtros específicos dos dados em planilha eletrônica. Foi refinada a rotina de acompanhamento dos dados de manutenções forçadas e programadas.

Relativo ao Objetivo 3 pode-se afirmar que o Pilar MP da Metodologia TPM na planta estudada absorveu parte da metodologia proposta, o que contribuiu para a Certificação da UHE Tucuruí nos Prêmio TPM Categoria Especial no ano de 2010, pela JIPM, e posteriormente nas Auditorias de Certificação do Prêmio *World Class* em 2012.

Novas especificações técnicas poderão tomar como base os dados analisados para a melhoria da disponibilidade dos novos equipamentos a serem adquiridos, com vistas ao entendimento que a redução da frequência de falhas é tão importante quanto à redução das intervenções.

Com base nos dados de entrada foi estabelecido um método de previsão dos Custos de Manutenção, que, juntamente ao critério de Disponibilidade, auxiliará a tomada de decisão por parte dos gestores por meio do estabelecimento de políticas, práticas e rotinas que visem a melhoria contínua do desempenho da empresa.

Como resultados do trabalho foram identificadas lacunas na normatização do Setor Elétrico que define a forma de controle do desempenho dos ativos, estabelecida uma sistemática de integração entre técnicas de modelagem de confiabilidade e disponibilidade, estabelecidos e incorporados indicadores de desempenho de Manutenção Programada em um agente do mercado, foram modelados e discutidos diferentes cenários para um Sistema de Circulação de Óleo e, finalmente, foi aplicado a toda uma Unidade Geradora Hidráulica por meio da modelagem do desempenho dos componentes mais críticos nos principais sistemas.

## 8. Referências Bibliográficas

ASCHER, H., FEINGOLD, H. **Repairable Systems Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and Their Causes**, New York: Marcel Dekker, 1 ed., 1984.

BALAKRISHNAN, N., RAO, C. R. **Handbook of Statistics - Reliability, Vol. 20**, Ontario: Elsevier, 1 ed., 2002.

BARRINGER, P. **Predict Failures: Crow-AMSAA 101 and Weibull 101**, Humble: Barringer & Associates, Disponível em: <<http://www.barringer1.com/pdf/Barringer-Kuwait-1.pdf>>, acessado em 01/10/2011, 2004.

BIROLINI, A. **Reliability Engineering - Theory and Practice**, New York: Springer, 6 ed., 2010.

BLANCHARD B. S., FABRYCKY W. J. **Systems Engineering and Analysis**, Saint Louis: Prentice Hall, 6 ed., 1998.

BURDEN, L., FAIRES, J. **Análise Numérica**, São Paulo: Thomson, 7 ed., 2003.

CARVALHO, A. L. **Comparação de metodologias para cálculo de confiabilidade em sistemas reparáveis**, PUC-MG, Simpósio Internacional de Confiabilidade, 2006.

CROARKIN, C., TOBIAS, P. **Engineering Statistics Handbook**, NIST/Sematech, Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>>, acessado em 10/10/2011, 2006.

DEGROOT, M., SCHERVISH, M. **Probability and Statistics**, Boston: Addison Wesley, 4 ed., 2012.

DEPARTAMENTO DE DEFESA E.U.A. **Reliability Growth Management**, AMSC, Disponível em: <[http://www.everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0099-0199/MIL-HDBK-189C\\_34842](http://www.everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0099-0199/MIL-HDBK-189C_34842)>, acessado em 15/10/2011, 3 ed., 2011.

DHILLON, B.S. **Engineering and Technology Management Tools and Applications**, Artech House, 1 ed., 2002.

DHILLON, B.S. **Engineering Maintenance - A Modern Approach**, CRC Press, 1 ed., 2002.

DHILLON, B.S. **Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineering**, CRC Press, 1 ed., 2006.

DHILLON, B.S. **Reliability, Quality and Safety for Engineers**, Taylor & Francis, 1 ed., 2005.

FILHO, G. B. **Indicadores e Índices de Manutenção**, Ciência Moderna, 1 ed., 2006.

FILHO, S.S. **Análise de árvore de falhas considerando incertezas na definição dos eventos básicos**, COPPE/UFRJ, p. 01 a 06, 2006.

FIRMINO, P. R., DROGUETT, E. L. **Estimação da cota inferior da confiabilidade de sistemas por árvores de falhas**, ABEPRO, Revista Pesquisa Operacional, v.26, n.2, p.383-402, 2006.

FIRMINO, P. R., MOURA, M. C., DROGUETT, E. L. **Política ótima de manutenção preventiva de sistemas reparáveis baseada em confiabilidade**, São Paulo, XX Copinaval, 2007.

FOGLIATTO, S. F., RIBEIRO, J. L. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**, Campus, 1 ed., 2009.

FONTES, R. D., DOMINGUES, L. A. *et al.* **Aplicação combinada de modelos de risco de falha de sistemas reparáveis e não reparáveis para cálculo da confiabilidade de equipamentos**, CIGRÉ, XX Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**, São Paulo, Atlas, 6 ed., 2008.

GRUPO TÉCNICO DE MANUTENÇÃO. **Análise estatística de desempenho de unidades geradoras hidráulicas, térmicas e equipamentos sob responsabilidade da geração**, ABRAGE, rv.00, 2008.

GRUPO TÉCNICO DE MANUTENÇÃO. **Análise estatística de desempenho de unidades geradoras hidráulicas, térmicas e equipamentos sob responsabilidade da geração**, ABRAGE, rv.00, 2009.

GUO, H., METAS, A., SARAKAKIS, G., NIU, P. **Piecewise NHPP Models with Maximum Likelihood Estimation for Repairable Systems**, Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings, 2010.

KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**, Qualitymark, 3 ed., 2009.

LINDSTAEDT, E. **Introdução a Avaliação de Desempenho**, Notas de Aula, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 1998.

LOGMAN, J., WANG, W. **On Reliability Modeling and Analysis of Highly-Reliable Large Systems**, Seattle: IEEE, 48th Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002.

METTAS, A., SAVVA, M. **System Reliability Analysis: The Advantages of Using Analytical Methods to Analyze Non-Repairable Systems**, Philadelphia: IEEE, 47th Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2001.

MINITAB Tutorial. **Introduction to Reliability - Release 15**, Minitab Inc., Disponível em: <<http://www.minitab.com/pt-BR/training/user-guides.aspx>>, acessado em 10/10/2011, 2006.

MOREIRA, P. I. **Análise da disponibilidade de sistemas elétricos durante a etapa de projeto com otimização do custo do ciclo de vida**, CIGRÉ, XXI Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2011.

MOUBRAY, J. **Reliability Centred Maintenance**, Aladon, 2 ed., 2003.

MOURA, M. J. C., DROGUETT, E. L. **Determinação do grau de eficácia de equipes de manutenção via Processo de Renovação Generalizado**, ABEPRO, XXVI Enegep, 2006.

PADRÃO SAE. **Critérios de Avaliação para Processos de Manutenção Baseados em Confiabilidade**, SAE, JA1011, 1999.

PATRIOTA, Y. **Manutenção Centrada em Confiabilidade: Manual de Implantação**, Qualitymark, 1 ed., 2003.

PHAM, H. **Handbook of Reliability Engineering**, Springer, 1 ed., 2003.

PIAZZA, G. **Introdução à Engenharia de Confiabilidade**, EDUCS, 1 ed., 2000.

PRADO, D. **Usando o ARENA em simulação**, INDG, 2 ed., 2004.

PROCEDIMENTOS DE REDE. **Indicadores de desempenho de equipamentos e linhas de transmissão e das funções transmissão e geração**, ONS, Submódulo 25.8, 2010.

RELIASOFT INC. **Repairable Systems Analysis**, Weibull.com, Disponível em: <[http://www.weibull.com/RelGrowthWeb/Repairable\\_Systems.htm](http://www.weibull.com/RelGrowthWeb/Repairable_Systems.htm)>, acessado em 01/09/2011, 2010.

SMITH, S. A., OREN, S. S. **Reliability Growth of Repairable Systems**, Wiley, Disponível em: <<http://www.ieor.berkeley.edu/~oren/pubs/growth.pdf>>, acessado em 20/10/2011, 1980.

SUN, A., KEE, E. **Application of Crow-AMSAA analysis to nuclear power plant equipment performance**, 13th International Conference on Nuclear Engineering, Disponível em: <<http://www.me.utexas.edu/~popova/icone50049.pdf>>, acessado em 20/09/2011, 2005.

SUZUKI, T. **TPM in Process Industries**, JIPM, 1 ed., 2000.

TRINDADE, D. **Computer simulation of reparable processes**, Sematech, Artwork IX, 1996.

VESELY, W. E., GOLDBERG, F. F. **Fault Tree Handbook**, Comissão Regulatória Nuclear dos E.U.A., 1 ed., 1981.

WALPOLE, R., MYERS, R. **Probabilidade & Estatística**, Pearson Prentice Hall, 8 ed., 2009.

## **9. Apêndice**

### 9.1 Script Maple® para resolução da Cadeia de Markov com 03 estados

```
> restart;
> eq0 := D(P0)(t) = mu[p]*P2(t)+mu[f]*P1(t)-
(lambda[f]+lambda[p])*P0(t);
> eq1 := D(P1)(t) = lambda[f]*P0(t)-mu[f]*P1(t);
> eq2 := D(P2)(t) = lambda[p]*P0(t)-mu[p]*P2(t);
> eqGeral := P0(t)+P1(t)+P2(t)=1;
> init_con := P0(0)=1,P1(0)=0,P2(0)=0;
> sys := eq0,eq1,eqGeral;
> L_eq0 := inttrans[laplace](eq0,t,s);
> L_eq1 := inttrans[laplace](eq1,t,s);
> L_eq2 := inttrans[laplace](eq2,t,s);
> L_eqGeral := inttrans[laplace](eqGeral,t,s);
> L_sys := L_eq0,L_eq1,L_eqGeral;
> result:= dsolve({sys,init_con},{P0(t),P1(t),P2(t)},
method=laplace);
> Pr0 := subs(result,P0(t));
> Pr1 := subs(result,P1(t));
> Pr2 := subs(result,P2(t));
```