



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL EM  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**GUSTAVO MONNÉ ALFARO**

**MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE DISPONIBILIDADE EM SISTEMAS DE USINAS  
HIDRELÉTRICAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

**PPGMC-UESC**

**ILHÉUS – BA**

**2015**

A385    Alfaró, Gustavo Monné  
Métodos para avaliação de disponibilidade em sistemas de usinas hidrelétricas na geração de energia / Gustavo Monné Alfaró. – Ilhéus, BA: UESC, 2015.  
138 f.: il.; anexos.

Orientadora: Dany Sanchez Dominguez.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-Graduação em Modulação Computacional em Ciência e Tecnologia.  
Inclui referências.

1. Usinas hidrelétricas. 2. Usinas hidrelétricas – Confiabilidade. 3. Sistemas de energia elétrica – Controle. 4. Energia elétrica – Produção. I. Título.

CDD 621.312134

**GUSTAVO MONNÉ ALFARO**

**MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE DISPONIBILIDADE EM SISTEMAS DE  
USINAS HIDRELÉTRICAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

**PPGMC – UESC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz como parte das exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Dany Sanchez Dominguez

ILHÉUS – BA

**2015**

**GUSTAVO MONNÉ ALFARO**

**MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE DISPONIBILIDADE EM SISTEMAS DE  
USINAS HIDRELÉTRICAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

**PPGMC – UESC**

Ilhéus – BA, 22 de janeiro de 2015

Comissão Examinadora



---

**Prof. Dr. Dany Sanchez Dominguez**

UESC

(Orientador)



---

**Prof. Dr. Gildson Queiroz de Jesus**

UESC



---

**Prof. Dr. José de Jesús Rivero Oliva**

UFRJ

## DEDICATÓRIA

*A minha família...*

## AGRADECIMENTOS

- A meu professor e orientador Dany Sanchez, pela fabulosa orientação e os intermináveis conselhos.
- Aos professores do curso, em especial a Francisco Bruno e Susana Marrero pelo apoio e suporte nestes dois longos anos.
- A meus amigos Luís e David, por ter me recebido e encaminhado na minha nova vida.
- A meu amigo Caio Argolo, pela constante ajuda.
- A meus amigos Juliana, Adam e Carlos, pelo carinho e a paciência.
- A meus caros colegas do curso, pelo apoio em todo momento.
- A meus amigos de Cuba, que apesar da distância sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis.
- Aos colegas do NBCGIB, pelo suporte e ajuda.

*“A ciência é composta de erros, que por sua vez, são passos em direção à verdade.”*

*Júlio Verne*

## RESUMO

O seguinte trabalho define e aplica duas metodologias de avaliação de disponibilidade instantânea, as quais foram especialmente arquitetadas para sua utilização em usinas hidrelétricas. Ambos os modelos de análises foram desenvolvidos utilizando como base alguns dos fundamentos das principais técnicas envolvidas nas análises de disponibilidade em sistemas industriais com altos riscos operacionais.

A primeira metodologia, nomeada Método de Matriz de Dependências (MMD), consiste numa abordagem qualitativa, onde cada elemento da usina avaliada, incluindo sistemas e subsistemas, é representado por um código alfanumérico na cela de uma estrutura matricial, ao tempo que o estado de disponibilidade desse elemento, representasse em correspondência com uma escala de cores constituída por cinco níveis de disponibilidade. A representação da usina na estrutura matricial, denominada Matriz de Dependências (MD), é realizada de acordo as relações formadas entre elementos e os níveis hierárquicos ocupados por eles no sistema. Esta característica possibilita calcular a disponibilidade do sistema mediante a propagação dos estados de disponibilidade a partir de mudanças no estado dos elementos mais simples, empregando para esse fim um conjunto de heurísticas recolhidas em dois algoritmos de varredura, encarregados de representar o estado final de disponibilidade do sistema avaliado.

A segunda metodologia consiste numa avaliação quantitativa, com base na teoria de propagação de Markov, na qual a disponibilidade de um sistema vai ser estimada mediante a aplicação iterativa de dois operadores matemáticos sobre um vetor de elementos, formado pelos valores iniciais de disponibilidade dos componentes do sistema, esta abordagem tem por nome Método de Propagação de Markov (MPM). As abstrações e estruturas de dados que sustentam o método são construídos a partir da representação do sistema mediante uma matriz de dependências.

As usinas empregadas no processo de validação dos métodos correspondem em primeira instância a um modelo genérico simplificado, e o segundo empreendimento corresponde a uma configuração real, derivada da usina de Água Vermelha operada pela empresa AES Tietê. Em ambos os casos foi avaliada com sucesso a disponibilidade dos empreendimentos utilizando diversos cenários de provas projetados para esse fim.

**Palavras chaves:** Usinas Hidrelétricas, Avaliação de Disponibilidade, Método de Matriz de Dependência, Método de Propagação de Markov.

## ABSTRACT

The following work develop two methods for instantaneous availability assessment, which have been specially adapted to use in hydroelectric power plants. Both assess models were developed using some of the principles of the main techniques involved in the analysis of availability in industries with high operational risks.

The first methodology, named Dependency Matrix Method, is a qualitative approach, where each element of the evaluated plant, including systems and subsystems, is represented by an alphanumeric code in the cell of a structure matrix, at the same time that the availability status of this element, is represented in correspondence with a color scale formed by five availability levels. The representation of the plant in the matrix structure, called dependencies matrix, is performed according the relationships formed between elements and the hierarchical levels occupied by them in the system. This feature makes it possible to calculate the availability of the system by propagating the states of availability from the changes in the state of the simple elements, employing for this purpose a set of heuristics collected in two scanning algorithms in charge of representing the final states of the evaluated system.

The second method is a quantitative approach based on the propagation theory of Markov, where the availability of a system will be estimated by the iterative application of two mathematical operators over one elements vector formed by the initial values of availability of the system components. This approach has the name of Markov Propagation Method. Abstractions and data structures that support the method are constructed from the representation of the system through a dependency matrix.

The plants used in the application and validation of the process model correspond in the first instance to a simplified generic model, and the second one belong to a real enterprise setting, derived from the Água Vermelha plant, operated by AES Tietê company. In both cases was successfully evaluated the availability on the projects using various scenarios, designed for this purpose.

**Keywords:** Hydroelectric Power Plants, Availability Assessment, Dependency Matrix Method, Markov Propagation Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porcentagens de geração de energia elétrica por fonte primária no mundo durante o ano 2010. ....	22
Figura 2 – Estrutura e principais componentes de uma UHE genérica. ....	23
Figura 3 – Representação simplificada dos componentes de uma UHE genérica. ....	24
Figura 4 – Representação de topologias de sistemas: (a) série, (b) paralelo, (c) série-paralelo ....	26
Figura 5 – Diagrama de Farmer para análises de riscos de acordo à frequência de ocorrência de um evento indesejado e sua gravidade. ....	28
Figura 6 – Alguns dos tempos envolvidos no funcionamento de um item, nos cálculos de disponibilidade. ....	32
Figura 7 – Representação do tempo de vida de um item até a primeira falha, conhecida como curva da banheira. ....	33
Figura 8 – Metodologias de avaliação de disponibilidade e confiabilidade. ....	35
Figura 9 – Algumas das técnicas empregadas na avaliação de disponibilidade e confiabilidade de sistemas industriais. ....	36
Figura 10 – Grafo da topologia de cadeia formada nas análises de Markov. ....	37
Figura 11 – Principais estruturas e formulações utilizadas pelo método de RBD nas análises de disponibilidade e confiabilidade. ....	41
Figura 12 – Representação em Árvore de Falhas da estrutura mostrada na Figura 4c. ....	42
Figura 13 – Estrutura de árvore correspondente aos elementos da representação simplificada da UHE mostrada na Figura 3. ....	47
Figura 14 – Escala qualitativa de disponibilidade utilizada no MMD. ....	49
Figura 15 – Fluxograma do algoritmo de varredura direta. ....	52
Figura 16 – Fluxograma do algoritmo de varredura indireta. ....	54
Figura 17 – Operador de dependências em série, onde são representados os elementos em série da matriz de dependências do sistema. ....	66
Figura 18 – Operador de dependências em paralelo, onde são representados os elementos redundantes da matriz de dependências estendida do sistema. ....	67
Figura 19 – Diagrama de fluxo do algoritmo da aplicação do MPM. ....	69
Figura 20 – Representação gráfica de uma lista duplamente encadeada, (a) estrutura de um elemento, (b) lista de elementos. ....	74
Figura 21 – Matriz de dependências representada usando uma lista de listas com elementos duplamente encadeados. ....	74
Figura 22 – Estrutura de pilha, (a) processo de armazenar e retirar elementos da estrutura de pilha, (b) construção da estrutura da pilha mediante encadeamento duplo dos elementos. ....	75
Figura 23 – Estrutura de classes do MMD. ....	77
Figura 24 – Estrutura de classes do MPM. ....	78
Figura 25 – Representação simplificada de uma usina hidrelétrica genérica. ....	81
Figura 26 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	84
Figura 27 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no cenário II sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis, e utilizando uma escala de tempo genérica. ....	87

Figura 28 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no cenário IV sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis, e utilizando uma escala de tempo genérica. ....	87
Figura 29 – Representação simplificada da UHE utilizada como Estudo de Caso II. ....	89
Figura 30 – Sistema de Regulação de Velocidade (SRV) da turbina no Estudo de Caso II. ...	89
Figura 31 – Sistema Anti-Incêndio (SAI) do gerador no Caso de Estudo II.....	90
Figura 32 – Sistema de Resfriamento do Transformador (RTR) no Caso de estudo II. ....	91
Figura 33 – Estado dos equipamentos após aplicação do algoritmo de varredura para o cenário I do caso de estudo II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	95
Figura 34 – Análise de sensibilidade do impacto da degradação linear do trocador de calor (RTR-IT1) sobre a disponibilidade do sistema, considerando a disponibilidade da alimentação elétrica da bomba de óleo (RTR-BO2-AE) degradada e constante, e os restantes componentes totalmente disponíveis, numa escala de tempo genérica.....	97
Figura 35 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário III sobre a disponibilidade do sistema, numa escala de tempo genérica. ....	98
Figura 36 – Diagrama de fluxo do algoritmo de busca de configurações críticas.....	99
Figura 37 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário I, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	111
Figura 38 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário II (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.....	112
Figura 39 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário II, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	113
Figura 40 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário II (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.....	113
Figura 41 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário III, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	114
Figura 42 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário III (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.....	115
Figura 43 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário IV, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	116
Figura 44 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário IV (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.....	116
Figura 45 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário V, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	117
Figura 46 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário V (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.....	118
Figura 47 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário VI, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	119
Figura 48 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário VI (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.....	119

Figura 49 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário VII, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	120
Figura 50 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário VII (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	121
Figura 51 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário I, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	124
Figura 52 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário II, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	126
Figura 53 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário III, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	128
Figura 54 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário IV, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	130
Figura 55 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário V, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	132
Figura 56 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário VI, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta. ....	134
Figura 57 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário I (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	135
Figura 58 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário II (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	135
Figura 59 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário III (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	136
Figura 60 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário IV (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	136
Figura 61 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário V (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	137
Figura 62 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário VI (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis. ....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empreendimentos para a geração de energia elétrica em operação no Brasil. ....	16
Tabela 2 – Matriz de dependências associada à representação simplificada da UHE ilustrada na Figura 3.....	46
Tabela 3 – Linhas da matriz de dependências associada à representação simplificada da UHE ilustrada na Figura 3 com diferentes valores de $P(x)$ .....	59
Tabela 4 – Matriz de dependências associada à representação simplificada da UHE ilustrada na Figura 3 com os níveis de dependência de cada linha.....	61
Tabela 5 – Matriz de dependências estendida para a aplicação do MPM .....	65
Tabela 6 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MMD correspondentes ao Estudo de Caso I. ....	83
Tabela 7 – Matriz de dependências resultante para o cenário I.....	83
Tabela 8 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MPM, correspondentes ao Estudo de Caso I. ....	86
Tabela 9 – Cenários e resultados da aplicação do MMD ao Caso de Estudo II.....	92
Tabela 10 – Matriz de dependências associada à UHE avaliada no Estudo de Caso II. ....	93
Tabela 11 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MPM, correspondentes ao Estudo de Caso II.....	96
Tabela 12 – Exemplos de configurações críticas do sistema analisado no Estudo de Caso I. .	99
Tabela 13 – Exemplos de configurações críticas do sistema analisado no Estudo de Caso II. ....	100
Tabela 14 – Comparação dos principais aspectos das metodologias de análises de disponibilidade MMD e MPM. ....	101
Tabela 15 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MMD e MPM, correspondentes ao Estudo de Caso I. ....	110
Tabela 16 – Matriz de Dependências resultante do Cenário I, Estudo de Caso I.....	111
Tabela 17 – Matriz de Dependências resultante do Cenário II, Estudo de Caso I. ....	112
Tabela 18 – Matriz de Dependências resultante do Cenário III, Estudo de Caso I. ....	114
Tabela 19 – Matriz de Dependências resultante do Cenário IV, Estudo de Caso I.....	115
Tabela 20 – Matriz de Dependências resultante do Cenário V, Estudo de Caso I. ....	117
Tabela 21 – Matriz de Dependências resultante do Cenário VI, Estudo de Caso I.....	118
Tabela 22 – Matriz de Dependências resultante do Cenário VII, Estudo de Caso I. ....	120
Tabela 23 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MMD e MPM, correspondentes ao Estudo de Caso II.....	122
Tabela 24 – Matriz de Dependências resultante do Cenário I, Estudo de Caso II. ....	123
Tabela 25 – Matriz de Dependências resultante do Cenário II, Estudo de Caso II. ....	125
Tabela 26 – Matriz de Dependências resultante do Cenário III, Estudo de Caso II.....	127
Tabela 27 – Matriz de Dependências resultante do Cenário IV, Estudo de Caso II. ....	129
Tabela 28 – Matriz de Dependências resultante do Cenário V, Estudo de Caso II.....	131
Tabela 29 – Matriz de Dependências resultante do Cenário VI, Estudo de Caso II. ....	133

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UTE	Usina Termoelétrica
UHE	Usina Hidrelétrica
CN	Central Nuclear
EOL	Central Geradora Eólica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UGT	Central Geotérmica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MD	Matriz de Dependências
MMD	Método de Matriz de Dependências
MPM	Método de Propagação de Markov
SEP	Sistema Elétrico de Potência
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
CAN	Componente de Alto Nível
CBN	Componente de Baixo Nível
UML	Unified Modeling Language
LIFO	Last In First Out
IDE	Integrated Development Environment

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	Introdução à pesquisa .....	15
1.2	Estrutura da dissertação .....	19
<b>2</b>	<b>DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA</b> .....	21
2.1	Sistemas elétricos de potência .....	21
2.2.1	Usinas hidrelétricas .....	22
2.2.2	Análises da representação simplificada de uma Usina Hidrelétrica .....	24
2.2.3	Modelagem de sistemas .....	25
2.2	Análises de riscos e gestão de ativos físicos .....	26
2.2.1	Panorâmica dos riscos .....	27
2.3	Avaliação de segurança em sistemas .....	29
2.4	Análises de confiabilidade e disponibilidade .....	29
2.5	Principais técnicas de análises de disponibilidade .....	34
2.5.1	Modelos de Markov .....	36
2.5.2	Métodos de Monte Carlo .....	38
2.5.3	Reliability Block Diagram .....	39
2.5.4	Árvore de falhas .....	41
2.6	Resumo do capítulo .....	42
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE MATRIZ DE DEPENDÊNCIAS</b> .....	44
3.1	Definição de Matriz de Dependências .....	45
3.2	Escala qualitativa de disponibilidade .....	48
3.3	Propagação de dependências no MMD .....	50
3.3.1	Varredura simples ou direta .....	51
3.3.2	Varredura complexa ou indireta .....	52
3.4	Avaliação de desempenho dos algoritmos de varredura .....	53
3.5	Algoritmos de ordenação no MMD .....	56
3.6	Etapas de transição no modelo de varredura .....	57
3.7	Resumo do capítulo .....	62
<b>4</b>	<b>MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DE MARKOV</b> .....	63
4.1	Fundamentos do Método de Propagação de Markov .....	63
4.2	Algoritmo iterativo de propagação Markoviana .....	67
4.3	Análises de desempenho do MPM .....	70

4.4	Resumo do capítulo.....	71
5	<b>IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS</b> .....	72
5.1	<b>Implementação</b> .....	72
5.1.1	Estruturas de dados .....	73
5.1.2	Estrutura de classes.....	75
5.2	<b>Estudo de Caso I</b> .....	79
5.2.1	Resultados do MMD.....	82
5.2.2	Resultados do MPM .....	84
5.3	<b>Estudo de Caso II</b> .....	88
5.3.1	Descrição do caso de estudo II .....	88
5.3.2	Resultados do MMD.....	92
5.3.3	Resultados do MPM .....	96
5.4	<b>Análises de disponibilidade e busca de configurações críticas</b> .....	98
5.5	<b>Comparação das metodologias MMD e MPM</b> .....	100
5.6	<b>Resumo do capítulo</b> .....	101
	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	102
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	106
	<b>ANEXOS</b> .....	109
	<b>ANEXO A – Resultados das análises correspondentes aos cenários do Caso de Estudo I</b> .....	110
	<b>ANEXO B – Resultados das análises correspondentes aos cenários do Caso de Estudo II</b> .....	122

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução à pesquisa

Com o começo da utilização em larga escala da energia elétrica, a invenção do telégrafo e a lâmpada elétrica entre outros descobrimentos do século XIX, responsáveis em grande parte pela segunda revolução que experimentou o setor industrial nesse período, foram dados os primeiros passos na formação dos sistemas eletro-energéticos da atualidade. No século XX, a energia elétrica passou de ser um luxo a uma necessidade, a tal ponto, que é impensável a existência das sociedades modernas sem o consumo de energia elétrica.

Como resultado desse processo contínuo de expansão do mercado energético, impulsionado pelo crescimento populacional e industrial a escala mundial, os sistemas eletro-energéticos converteram-se em uns dos maiores e mais complexos setores industriais em exploração. A base dos sistemas eletro-energéticos é constituída pelas plantas de geração de energia elétrica, as quais incluem na atualidade diversas fontes de exploração de energia. Entre os principais tipos de usinas encontram-se:

- Usina Termoelétrica (UTE),
- Usina Hidrelétrica (UHE),
- Central Nuclear (CN),
- Central Geradora Eólica (EOL),
- Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV),
- Central Geotérmica (UGT).

Dentro deste grupo, as UHE destacam-se por ser a fonte de energia renovável mais explorada a nível mundial, produto das melhores relações custo-benefício. No Brasil, dados

os grandes recursos hídricos existentes e características favoráveis do relevo, a construção de usinas hidrelétricas tem levado à geração hídrica de energia a ser um dos maiores representantes do setor industrial no país, que segundo os dados do IBGE<sup>1</sup> representou 75,2% da geração elétrica total do país em 2013 (IBGE, 2013). A *Tabela 1* mostra um resumo das capacidades de geração por tipo de usinas em funcionamento no país até o presente ano, a potência outorgada correspondente àquela considerada no ato de outorga e a potência fiscalizada corresponde àquela considerada a partir da operação comercial realizada pela primeira unidade geradora. Sendo especificado para a geração hidrelétrica, as usinas de pequeno e médio porte como, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), dado o grande número de unidades existentes, (ANEEL, 2014).

Tabela 1 – Empreendimentos para a geração de energia elétrica em operação no Brasil.

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	474	291.832	293.433	0,22
EOL	184	3.968.534	3.884.238	2,96
PCH	470	4.725.850	4.689.552	3,57
UFV	180	18.382	15.312	0,01
UHE	198	86.999.345	82.987.658	63,17
UTE	1.872	39.299.633	37.507.887	28,55
CN	2	1.990.000	1.990.000	1,51
<b>Total</b>	<b>3.380</b>	<b>137.293.576</b>	<b>131.368.080</b>	<b>100</b>

Fonte: Dados tomados da ANEEL - <http://www.aneel.gov.br> (2014).

Em termos de qualidade, a produção de energia elétrica constitui um serviço que deve garantir o fornecimento contínuo de energia aos clientes, cumprindo com determinadas normas de qualidade, geralmente implantadas de forma regional. Basicamente, o serviço elétrico normatiza parâmetros como tensão, intensidade e frequência, em faixas com pequenas margens de erro, para satisfazer as necessidades dos consumidores; tendo presente que, flutuações nesses parâmetros podem causar severos danos aos equipamentos conectados à rede elétrica, ou ter consequências maiores como blecautes, tendo um impacto de grande escala na sociedade e na economia de uma região ou país (ANEEL, 2012).

O risco econômico derivado da interrupção da produção ou dos serviços, constitui um dos últimos elementos levados em conta no gerenciamento de ativos físicos. Estes

<sup>1</sup> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

procedimentos surgiram focados na avaliação de danos às instalações, ao pessoal de operação, à população nas áreas adjacentes e ao meio ambiente. Sendo os motores impulsores do desenvolvimento dessas metodologias de análises, a indústria nuclear e aeroespacial, devido ao elevado perigo de operação associado a estes setores, e sendo levadas posteriormente à indústria naval, elétrica e petroquímica.

Dentro do setor de produção de energia, são as usinas term nucleares as instalações nas quais as análises de risco são feitas com maior rigor, embora esse tipo de avaliação seja necessário em qualquer instalação do ramo. Mesmo sendo este um fator imprescindível, ainda existem instalações de geração hidrelétrica que não seguem ou normatizam eficientemente tais metodologias. Exemplo das consequências que podem acarretar tais procedimentos, são acidentes como ocorridos nas UHE de Sayano-Shushenskaya em 2009 na Rússia (YANG et al., 2011), e Cerro Pelado em 2010 na Argentina (PUJOL; PUJOL, 2013).

Em geral, os sistemas de geração elétrica são caracterizados pela degradação constante de seus componentes, como consequência do regime adverso de trabalho ao qual estão expostos. Nestas circunstâncias é possível obter uma medida do desempenho do sistema avaliando a perda de confiabilidade e seu impacto negativo na disponibilidade (WANG, 2002). Este constitui um dos mecanismos que ajuda a ter sob controle grande parte dos riscos associados à produção de energia.

Produto da grande influência que tem a degradação sobre o desempenho dos componentes, é extremamente importante para a operação e a manutenção do sistema dispor de métodos confiáveis capazes de determinar em curto prazo o efeito da degradação dos componentes sobre o desempenho dos equipamentos e, por sua vez, determinar o efeito da degradação dos equipamentos sobre o desempenho do sistema como um todo. Por exemplo, a Manutenção Orientada por Confiabilidade (WANG, 2002), e os Programas de Gestão de Ativos Físicos introduzidos na norma PAS 55 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2008) precisam desse tipo de avaliação integral do sistema.

Particularmente no Brasil, a matriz de geração de energia elétrica é dominada por usinas hidrelétrica. Dessa forma, garantir uma correta operação desses sistemas é uma tarefa que precisa de uma atenção constante, e ao mesmo tempo constitui objetivo e um tema de estudo entre pesquisadores de todo mundo, que procuram as melhores soluções para alcançar essa finalidade.

Com essa finalidade tem sido desenvolvidas várias técnicas de avaliação de disponibilidade e confiabilidade, as quais podem ser agrupadas em dois grandes conjuntos, metodologias analíticas ou de simulação, tendo uma grande aceitação dentro da comunidade científica: as análises utilizando Cadeias de Markov, simulações de Monte Carlo, os métodos de Diagrama de Sucesso e Árvores de Falhas, ou a combinação dessas e outras metodologias existentes na formação de modelos híbridos.

Depois de uma ampla revisão da literatura chegou-se à conclusão de que a aplicação dos modelos analíticos requerem o emprego de valores de probabilidades acumulados durante um extenso período de tempo, e por sua parte os modelos de simulação apresentavam alta complexidade, o que precisa de pessoal experiente e altamente qualificado para a implantação deles (ROUVROYE; BLIEK, VAN DEN, 2002). Neste sentido, a presente pesquisa está encaminhada a desenvolver novas técnicas para avaliação de disponibilidade de sistemas a partir da disponibilidade dos componentes básicos, de modo que sejam utilizados modelos simples de análises que possibilitem a rápida absorção e implantação destas técnicas no setor industrial.

Este trabalho objetiva o desenvolvimento e caracterização de novas técnicas para avaliação de disponibilidade e confiabilidade em sistemas de potência para geração de energia elétrica. Especificamente, propomos o desenvolvimento, implementação e validação de duas técnicas: a primeira, de caráter qualitativo e baseada no uso de matrizes de dependências, e a segunda de caráter quantitativo sustentada por técnicas iterativas de propagação Markoviana.

As técnicas propostas deveram ser otimizadas para gerar resultados precisos na avaliação de disponibilidade de cascatas de usinas hidrelétricas, onde as atividades de operação e manutenção de diversas usinas inter-relacionam-se ao utilizar os mesmos recursos hídricos. Os códigos computacionais desenvolvidos utilizaram técnicas de computação de alto desempenho, ao tempo que as implementações serão disponibilizadas em funções simples que possibilitem sua fácil reutilização por outros membros da comunidade acadêmica. Serão criadas estruturas e representações gráficas para facilitar a assimilação das metodologias propostas por outros setores, principalmente o ramo industrial.

Os objetivos específicos do trabalho de dissertação identificam-se como:

- i. Assimilar e aprimorar os fundamentos matemáticos, as inferências lógicas, as categorias qualitativas e os algoritmos de varredura para utilizar o Método de Matriz de Dependências (MMD) na avaliação de disponibilidade de cascatas de usinas

- hidrelétricas para a geração de energia. Visando implementações computacionalmente eficientes no consumo de memória e tempo de processamento.
- ii. Desenvolver os fundamentos matemáticos, as inferências lógicas e o algoritmo para utilizar o Método de Propagação Markoviana (MPM) na avaliação de disponibilidade/confiabilidade de cascatas de usinas hidrelétricas para a geração de energia.
  - iii. Implementar, validar e caracterizar o desempenho de dois códigos computacionais para avaliação de disponibilidade/confiabilidade. O primeiro código baseado no MMD (objetivo i), e o segundo baseado no MPM (objetivo ii). A validação dos métodos e do código computacional envolve a resolução de problemas modelos típicos e análise crítica dos resultados. A caracterização do desempenho computacional de ambos os códigos considera o consumo de memória e de tempo de processamento.
  - iv. Analisar e comparar os resultados obtidos pelas metodologias MMD e MPM na avaliação de disponibilidade de usinas hidrelétricas, mediante o emprego de modelos simplificados.

## 1.2 Estrutura da dissertação

O presente documento de dissertação está estruturado em seis capítulos abordando os seguintes tópicos:

- No *Capítulo 1* é realizada a introdução ao trabalho, introduzindo a importância das análises de confiabilidade e disponibilidade em sistemas industriais, especificamente em sistemas elétricos. Além disso, são apresentados os objetivos do trabalho e os principais elementos que fazem parte dele.
- O *Capítulo 2* faz uma revisão dos tópicos básicos referentes às análises de disponibilidade em sistemas de geração de energia, tais como estrutura e representação de sistemas, as análises de riscos e segurança em sistemas energéticos, e as principais metodologias destinadas à avaliação de disponibilidade e confiabilidade em sistemas industriais, assim como os principais conceitos e fundamentos matemáticos associados a esses estudos.
- No *Capítulo 3* são apresentadas as definições e estruturas do MMD, as representações qualitativas de disponibilidade, a formação das matrizes de dependência, os algoritmos de varredura para cálculo de disponibilidade e as análises de complexidade algorítmica associadas a eles.

- No *Capítulo 4* é abordado o método MPM, mostrando as características principais, as formulações do modelo matemático, a concepção de estruturas lógicas para o desenvolvimento dos códigos computacionais, e os estudos de complexidade algorítmica.
- No *Capítulo 5* são utilizados os métodos desenvolvidos (MMD e MPM) na avaliação de disponibilidade em dois modelos de UHE simplificadas, mostrando os resultados obtidos na simulação de vários cenários de testes.
- Finalmente, o *Capítulo 6* apresenta as conclusões da pesquisa, assim como as principais contribuições e futuros desdobramentos desta pesquisa.

## **2 DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

O estudo de disponibilidade e confiabilidade em sistemas elétricos, de forma geral, está associado a análises de risco ou segurança de sistemas, elementos de grande utilidade na operação e planejamento de um empreendimento industrial. Com a finalidade de proporcionar uma visão geral de cada um dos elementos envolvidos no processo de avaliação da disponibilidade num sistema, este capítulo introduz os conceitos fundamentais referentes a sistemas de geração de energia hidrelétrica, as análises de segurança e risco em sistemas, as técnicas básicas de representação de sistemas elétricos, assim como as principais metodologias de avaliação de disponibilidade e confiabilidade empregados na indústria.

### **2.1 Sistemas elétricos de potência**

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) constitui uma rede de instalações elétricas destinadas à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Um exemplo de SEP é a malha formada para fornecer energia em bairros ou indústrias dentro de uma região delimitada. Estas estruturas são conformadas pelo agrupamento de três grandes domínios, definidos como: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

- A geração de energia elétrica, abrange todas as formas de produção, as quais estão baseadas na transformação de alguma forma de energia (cinética, calor, etc.) em energia elétrica.
- A transmissão de energia elétrica garante o transporte de energia das plantas de geração até os grandes centros de consumo.
- A distribuição de corrente elétrica é formada por complexas malhas que fornecem energia para cada unidade consumidora em particular.

Da mesma forma, pequenos SEP podem ser encontrados em indústrias, grandes centros comerciais, e hospitais, entre outros.

As formas de geração elétrica, são bem diversas, entre as principais destacam-se a geração térmica convencional, hidrelétrica, nuclear e eólica. A *Figura 1* mostra as porcentagens de geração de energia elétrica a nível mundial dos distintos tipos de usinas no ano 2010 (IBGE, 2013), onde a energia produzida a partir de recursos hídricos ocupa um lugar significativo entre as restantes fontes de geração.

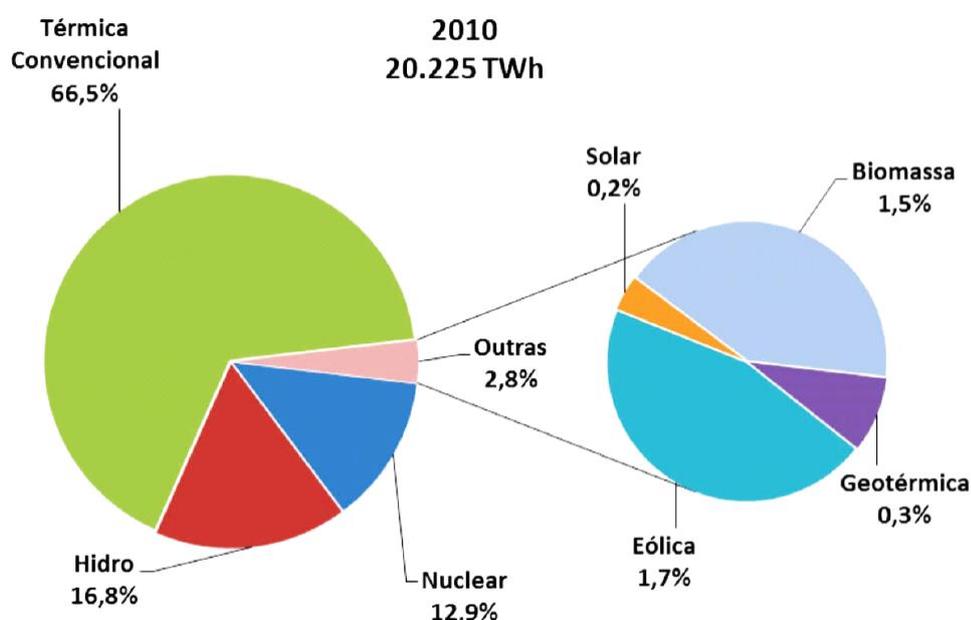


Figura 1 – Porcentagens de geração de energia elétrica por fonte primária no mundo durante o ano 2010.

Fonte: Elaborada a partir de dados do IBGE - <http://www.epe.gov.br>

### 2.2.1 Usinas hidrelétricas

Na natureza, a energia não pode ser criada nem destruída, no entanto pode ser transformada. Na geração de eletricidade, nenhuma nova forma de energia é criada, simplesmente um tipo de energia é transformado em outro, especificamente, em usinas hidrelétricas, a transição acontece de energia cinética a energia elétrica.

As usinas hidrelétricas baseiam seu funcionamento na criação de reservatórios, geralmente em rios e lagos, de forma que sejam produzidas diferenças nos níveis de água que possibilitem um fluxo provocado pela força de gravidade. Este fluxo deve ser o suficientemente forte para mover as paletas de uma turbina acoplada a um gerador de eletricidade. Convertendo dessa forma, a energia cinética em energia elétrica. Dependendo

das condições hidrográficas e topográficas, vários reservatórios podem ser construídos em cascata, o que vai dar origem a uma sequência de usinas, as quais vão compartilhar a mesma fonte de energia, e porém vão ter um relacionamento de dependência funcional (SEVÁ, 2011).

A produção de energia em usinas hidrelétricas representa parte importante da geração de energia elétrica mundial. Esta forma de geração destaca-se por ser a maior fonte de energia renovável em exploração, e como já foi analisado no capítulo introdutório, constitui a maior componente na matriz energética do Brasil.

As usinas hidrelétricas, já sejam de pequeno, médio ou grande porte, apresentam estrutura e funcionamento semelhante. A *Figura 2* representa uma usina genérica, onde são identificados, uma barragem que forma o reservatório, do qual o fluxo de água é controlado por um sistema de comportas, e conduzido através das paletas de uma turbina, diretamente acoplada a um gerador que produz a corrente elétrica, que é levada pelas linhas de transmissão até os centros de consumo. No processo de transmissão a tensão de saída do gerador é incrementada várias vezes no transformador, com o objetivo de reduzir as perdas por transmissão em grandes distâncias.

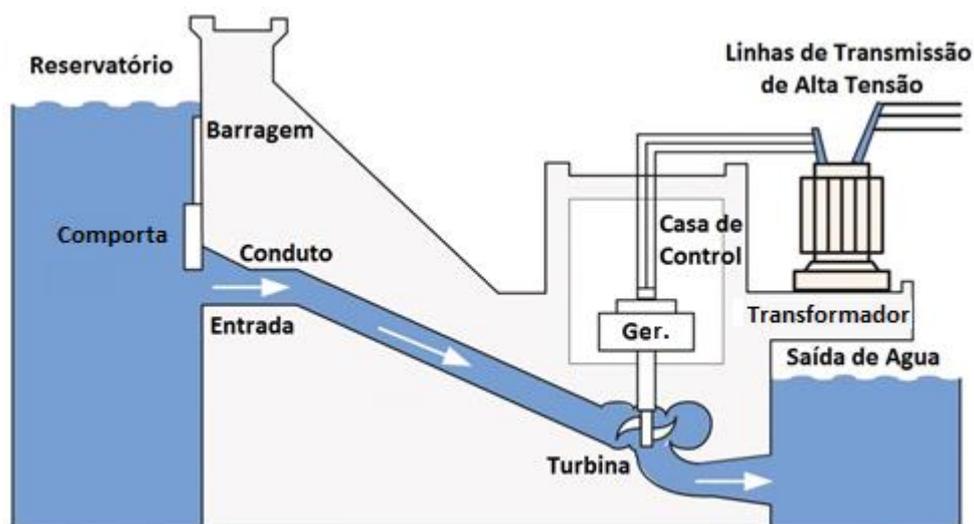


Figura 2 – Estrutura e principais componentes de uma UHE genérica.

Em geral, usinas de médio e grande porte possuem mais de um turbogruppo (turbina-gerador), o que possibilita estabelecer estratégias de manutenção sem afetar a produção da usina de forma significativa. Este tipo de arquitetura baseada no uso de elementos redundantes é uma estratégia utilizada na maior parte dos subsistemas que conformam um

SEP, elas tem como finalidade garantir a segurança, confiabilidade e disponibilidade do sistema.

### 2.2.2 Análises da representação simplificada de uma Usina Hidrelétrica

A representação visual de sistemas, é uma etapa fundamental no processo de análises da dinâmica de uma planta. Com esse objetivo, são padronizados símbolos de componentes, que permitem esquematizar complexas estruturas em simples diagramas como o apresentado na *Figura 3*, a qual mostra uma representação simplificada de uma UHE genérica.

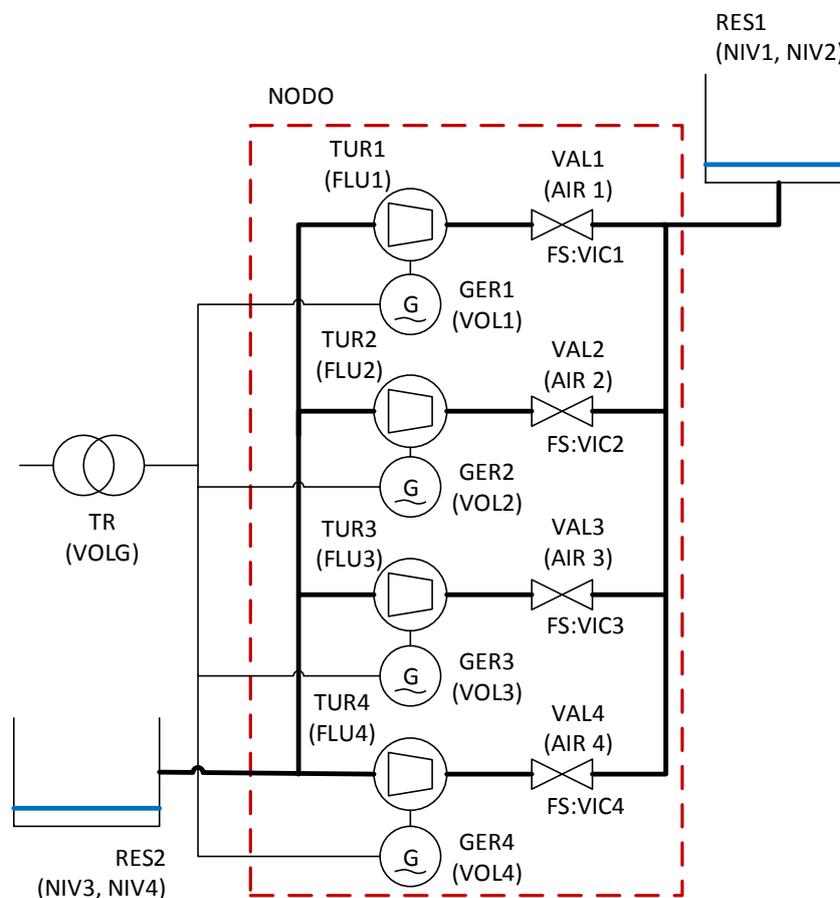


Figura 3 – Representação simplificada dos componentes de uma UHE genérica.

O diagrama da usina mostrada na *Figura 3*, vai ser o modelo de estudo, utilizado para ilustrar o desenvolvimento das metodologias de análises de disponibilidade, apresentadas nos próximos capítulos.

O diagrama em questão, exhibe dois reservatórios de água (RES1) e (RES2), a montante e jusante respectivamente. O fluxo de água que vai circular entre eles por queda livre, vai ser conduzido por quatro condutos e controlado por uma válvula de água (VAL),

situada na entrada de cada um dos condutos. Cada fluxo de água vai ser destinado a mover as paletas de uma turbina (TUR) acoplada a um gerador de energia elétrica (GER). A tensão de saída dos geradores vai ser elevada numa subestação representada pelo transformador (TR).

Uma vez detalhado o diagrama da Usina, se compararmos ele com o desenho apresentado na *Figura 2*, é possível encontrar todos os elementos dentro do diagrama, e até outros componentes que não formam parte dessa representação inicial. Mesmo assim o diagrama é um modelo simplificado devido que a representação de uma UHE real, embora sendo de pequeno porte, vai ter uma quantidade de componentes significativamente superior.

Cada um dos componentes apresentados da usina, tem no diagrama, entre parêntesis, os nomes dos parâmetros operacionais relacionados funcionalmente com eles. Estes últimos, vão ser introduzidos no *Capítulo 3*, onde serão analisadas com maior profundidade as relações de dependência entre os elementos constitutivos de uma UHE.

### 2.2.3 Modelagem de sistemas

A redução de sistemas, já sejam elétricos ou de outra natureza, mediante a agrupação de itens funcionalmente similares, é um mecanismo de otimizar as formas de representação de sistemas e conseqüentemente as análises e estudos de processos simples desenvolvidos por eles. Entenda-se por item, qualquer parte, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente (ABNT, 1994).

O desenho de sistemas é caracterizado pelo uso de topologias de rede que acrescentem suas funcionalidades. Neste sentido, a fidelidade dos modelos de uma planta é um elemento de extrema importância para o futuro estabelecimento de técnicas que possibilitem a avaliação de disponibilidade ou outras análises. A inter-relação dos itens de uma planta pode ser caracterizada e descomposta em esquemas simples que possibilitem um melhor entendimento e conseqüentemente, uma análise mais profunda. Na prática, os sistemas de geração de energia são frequentemente representados por redes onde os componentes formam conexões em série, em paralelo ou a mistura delas de acordo aos esquemas apresentados na *Figura 4*. Estas conexões, desde o ponto de vista de disponibilidade, são definidas como:

- i. Um grupo de itens que formam um sistema estão em série quando são necessários todos os itens funcionando para o sistema trabalhar satisfatoriamente, caso um deles falhar vai levar conseqüentemente à falha do sistema.

- ii. Um grupo de itens que formam um sistema estão em paralelo quando só é preciso um componente funcionando para garantir o funcionamento do sistema, o sistema vai falhar se todos os seus componentes deixassem de funcionar.

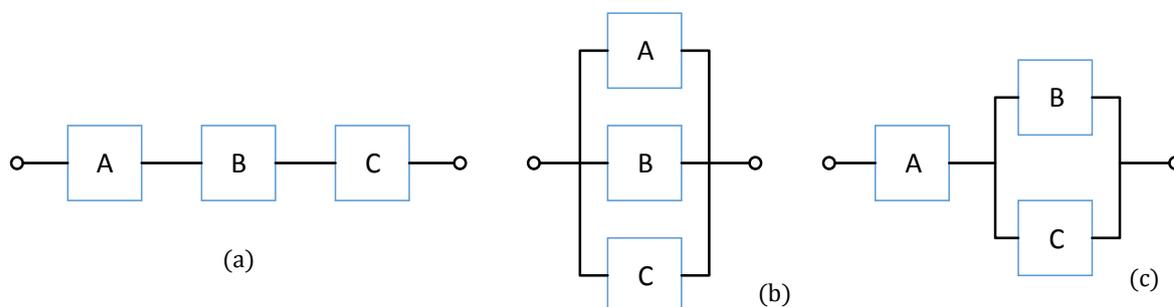


Figura 4 – Representação de topologias de sistemas: (a) série, (b) paralelo, (c) série-paralelo

Em sentido geral, as topologias apresentadas na *Figura 4*, são extensamente utilizadas na redução e representação de sistemas, incluído as mais diversas aplicações, que vão desde simples modelos até complicados sistemas com lógicas operacionais extremamente complexas (BILLINTON; ALLAN, 1984).

## 2.2 Análises de riscos e gestão de ativos físicos

Os ativos físicos são definidos como ativos tangíveis pertencentes a uma organização, sendo sua correta gestão um fator fundamental para o desenvolvimento da entidade. Dessa forma, a gestão de ativos físicos pode se definir como a política traçada por uma empresa para alcançar os seus objetivos, a qual envolve o planejamento coordenado e otimizado, a seleção de ativos, aquisição, desenvolvimento, utilização, cuidados (manutenção) e eliminação final ou renovação dos ativos e sistemas de ativos adequados.

A integração e otimização da gestão de ativos começou seu desenvolvimento na década de 1990 na indústria de petróleo e gás do Mar do Norte, e o setor público australiano, tendo como objetivo identificar uma série de processos essenciais de negócios, atividades de alinhamento e integração de sistema capazes de gerar um desempenho significativo.

As análises de risco envolvem a busca de soluções às possíveis ocorrências de eventos indesejados. Em geral são ações ligadas à seguridade, independentemente do meio onde sejam avaliadas, já seja no âmbito empresarial ou industrial. Na atualidade, manter controlados rigorosamente todos os possíveis riscos dentro de uma instituição, constitui uma política global na área de segurança. De forma geral as análises de risco integram-se como um

elemento de grande importância na gestão de ativos físicos, uma vez que visam garantir a integridade das instalações e seu entorno durante todo o ciclo de vida do empreendimento.

### 2.2.1 Panorâmica dos riscos

Em sistemas industriais os riscos adquirem grande relevância devido às consequências negativas que podem trazer, associadas a ocorrência dos eventos indesejados que eles identificam. Neste sentido, as análises ultrapassam o simples fato de avaliar os riscos caracterizados pela visibilidade dada sua presença física, os diagnósticos procuram novas formas de risco relacionadas ao perigo de acontecimentos de eventos indesejados, determinado pela probabilidade da ocorrência do conjunto de causas e a gravidade das consequências ou desdobramentos associadas ao evento (MÉTAYER; HIRSCH, 2008).

Os estudos das causas potenciais que podem conduzir a um evento indesejado, são geralmente realizados usando estruturas hierárquicas, mediante uma análise causal do sistema. A identificação das causas principais ou secundárias pode ser definida por uma estrutura de árvore, conhecida como árvore de falhas, ferramenta amplamente utilizada nas análises de riscos.

Nas políticas de risco são comuns as análises das funções de segurança e barreiras de contenção, as quais conformam um conjunto de mecanismos encaminhados a evitar o desenvolvimentos de eventos acidentais ou reduzir as consequências do acontecimento.

Por outro lado, resulta interessante abordar outra perspectiva no tratamento de riscos. Pode-se afirmar que nem sempre eliminar um risco é a solução ótima, no âmbito de análises econômica, a sensibilidade no tratamento de riscos, avaliando até que ponto pode ser explorado um determinado processo, e as possíveis consequências provocadas por sua falha, pode voltar em grandes benefícios econômicos. Neste tipo de análises é vital ter conhecimentos profundos do sistema avaliado.

Na gestão de riscos, é possível definir um determinado domínio de segurança, baixo o qual é efetuada a operação de um sistema. A região é definida pelas margens onde o risco é o suficientemente pequeno para ser aceito. Este domínio pode ser caracterizado pelos valores de frequência e gravidade associada à ocorrência de cada evento que caracteriza o sistema. O gráfico da *Figura 5* define um domínio de segurança caracterizado por dois parâmetros, a gravidade de um evento ou da combinação de vários eventos, e a frequência de ocorrência associada. Este domínio de segurança é frequentemente utilizado para caracterizar as política

de riscos no funcionamento de uma entidade ou sistema, esta representação é também conhecida como diagrama de Farmer (DOS SANTOS, 2003).

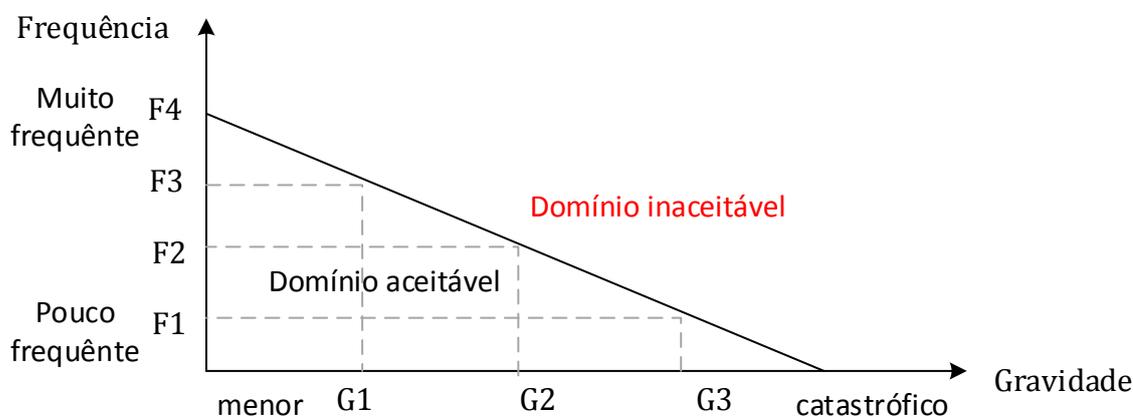


Figura 5 – Diagrama de Farmer para análises de riscos de acordo à frequência de ocorrência de um evento indesejado e sua gravidade.

A frequência de ocorrência de um evento pode ser tratada na operação de sistemas como a frequência de falha de um componente. Embora esse seja o recurso mais amplamente utilizado, outras análises como o tempo de vida de um elemento, geralmente determinada pela degradação constante associada ao seu funcionamento, podem ser utilizadas para caracterizar as margens de risco do funcionamento de uma entidade.

As ações de segurança destinadas ao controle de riscos têm por objetivo eliminar, reduzir ou controlar um risco identificado e catalogado como inaceitável após sua avaliação. Basicamente trata-se de mover as variáveis frequência e gravidade do diagrama de Farmer da *Figura 5*, de forma tal que os riscos fiquem dentro do domínio de segurança. Estas ações podem se definir como:

- **Prevenção:** ações destinadas à diminuição da probabilidade de ocorrência de um evento indesejado, mantendo constante a gravidade das consequências associadas.
- **Proteção:** consiste em limitar a gravidade das consequências de um evento indesejado após sua ocorrência, sem considerar a probabilidade do mesmo.

Outras medidas de segurança que podem ser empregadas no controle de riscos, são as ações de seguro, onde os prejuízos passam a uma segunda entidade mediante uma compensação econômica.

### 2.3 Avaliação de segurança em sistemas

A avaliação de segurança em sistemas industriais está associada à aplicação de diversas metodologias, as quais podem ser separadas em vários grupos com a finalidade de ter uma melhor perspectiva do objetivo estudado (SANTOS, DOS, 2003), as análises classificam-se como segue:

- Análises por eventos.
- Análises por zonas.
- Análises no espaço de tempo.

A análise por eventos, esta enfocada a identificar e avaliar cenários de ocorrências que provoquem consequências indesejadas, este tipo de apreciação utiliza métodos estáticos, analíticos e de simulação.

A avaliação por zonas está encaminhada a identificar o lugar onde teve a ocorrência à falha, o mecanismo de propagação e o índice de agressão sobre outras áreas, avaliando também o comportamento em esquemas de trabalho redundantes.

O estudo de tempo, associado à ocorrência de eventos indesejados enfoca-se em delimitar estritamente cada intervalo de tempo que foi e será consumido até a aplicação de uma resposta determinada. Estas análises tem maior profundidade no estudo da atuação das proteções dos sistemas, onde as escalas de tempo são extremadamente pequenas, de modo que, uma insignificante demora pode ter consequências altamente desfavoráveis.

### 2.4 Análises de confiabilidade e disponibilidade

O principal objetivo dos estudos de disponibilidade e confiabilidade em sistemas é fornecer informações que auxiliem no processo de tomar decisões. Em sistemas industriais, as análises de disponibilidade e confiabilidade são de grande utilidade no âmbito de análises de riscos, na otimização da manutenção e operação, e no controle da qualidade e segurança. A eficiência destas análises dentro de grandes sistemas assegura o funcionamento contínuo sem falhas, e caso de existir alguma, contribuem ao rápido retorno do sistema ao funcionamento padrão. Estes parâmetros são conceitualmente definidos em (ABNT, 1994) como segue:

- Disponibilidade  
“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.”

- Confiabilidade

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

Os termos previamente definidos também são utilizados para dar uma medida do desempenho de disponibilidade ou confiabilidade de um sistema em cada caso. Utilizando como base as anteriores definições, a disponibilidade em Usinas Hidrelétricas refere-se à capacidade de uma unidade geradora de prover a energia planejada, sem falha ou degradação significativa de seu estado operacional, em um determinado período de tempo. Adicionalmente, o termo de disponibilidade deve ser diferenciado entre disponibilidade de um item  $A(t)$  definida em um tempo  $t$ , e a disponibilidade média de um item  $A$  (BRADT, 1997). Considerando que um item reparável comece seu funcionamento no tempo  $t = 0$ ; quando o item falha, a ação de restauração é iniciada com a finalidade de pôr o item disponível novamente. O estado do item no tempo  $t$  expressa-se como:

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{quando um item está funcionando no tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

então, a disponibilidade  $A(t)$  de um item reparável define-se como a probabilidade do item funcionar corretamente no tempo  $t$ :

$$A(t) = \Pr(X(t) = 1). \quad (1)$$

De forma semelhante à indisponibilidade  $U$  de um item reparável pode ser expressa como a probabilidade de um item não funcionar no tempo  $t$ :

$$U(t) = 1 - A(t) = \Pr(X(t) = 0) \quad (2)$$

O estado do funcionamento de um item, de acordo ao conceito de disponibilidade, refere-se ao item em estado ativo ou em condições de operar se for necessário.

Em muitas situações resulta conveniente obter valores de disponibilidade em intervalos de tempo, com esse fim é definida na eq.(3) a disponibilidade média num intervalo de tempo  $(t_1, t_2)$  a partir dos valores de disponibilidade instantânea de um item:

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

A disponibilidade média  $\bar{A}$  descreve a proporção média de tempo associada ao funcionamento de um item. Supondo um número de reparos de um item se aproximando ao infinito, e condições ideais de reparo, ou seja o item vai funcionar como se estivesse novo após cada reparação, é possível chegar a seguinte expressão de disponibilidade média:

$$\bar{A} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}, \quad (4)$$

onde as variáveis MTTF e MTTR fazem referência ao tempo médio de falha (Mean Time To Failure) e o tempo médio de reparo (Mean Time To Repair) respectivamente. Então, a indisponibilidade média  $\bar{U}$  pode ser expressa como:

$$\bar{U} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR}. \quad (5)$$

Quando ao MTTR são adicionados os tempos de detecção e diagnósticos de falhas, as movimentações logísticas, os testes e inicialização de um item, se cria um segmento de tempo no qual o item está fora de serviço, assim o tempo total de falha MDT (Mean Down Time) em cenários específicos descreve com maior precisão a disponibilidade de um item. Por outro lado, em aplicações de manutenção o tempo médio de reparo MTTR pode ser chamado como MUT (Mean Up Time) e o ciclo que experimenta um item entre duas falhas, define-se, como MTBF (Mean Time Between Consecutive Failures). A *Figura 6* ilustra os tempos definidos de acordo ao estado de disponibilidade de um item. Definições mais abrangentes de tempos e estados de um item podem ser encontradas em (ABNT, 1994).

As taxas de falha e reparo de um item definidas na literatura pelas variáveis  $\lambda$  e  $\mu$  respectivamente, identificam o número de falhas e reparos de um item por unidade de tempo. A partir delas a disponibilidade de um item pode ser reescrita como:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (6)$$

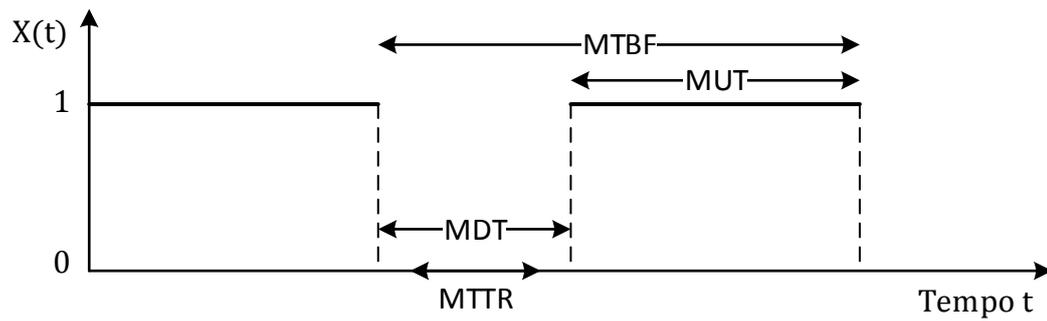


Figura 6 – Alguns dos tempos envolvidos no funcionamento de um item, nos cálculos de disponibilidade.

Em sistemas não reparáveis as análises de confiabilidade e disponibilidade utilizam um conjunto de distribuições que caracterizam o comportamento da disponibilidade no tempo do item avaliado. A classificação não reparável indica que o estudo de seu comportamento vai ser realizado até o momento que existir uma falha, período de tempo descrito pela variável  $T$ , a qual, dependendo do sistema analisado vai ser do tipo contínua ou discreta. Supondo que nossa variável  $T$  é continuamente distribuída, com função densidade de probabilidade  $f(t)$  e função de distribuição  $F(t)$ , é possível definir:

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad \forall t > 0 \quad (7)$$

onde  $F(t)$  representa a probabilidade do item falhar no intervalo  $(0, t]$ .

A partir da função  $F(t)$  é simples deduzir uma função  $R(t)$ , que representa o valor de confiabilidade do sistema a partir da função de probabilidade *eq.(8)*, função densidade de probabilidade *eq.(9)*, e taxas de falhas de um item *eq.(10)*, (RAUSAND; HOYLAN, 2004).

$$R(t) = 1 - F(t) = \Pr(T > t) \quad \forall t > 0 \quad (8)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du \quad \forall t > 0 \quad (9)$$

A função de confiabilidade expressa a probabilidade do item estudado não falhar no intervalo de tempo  $(0, t]$ . Relacionada à função de confiabilidade, existe outra função  $z(t)$  que define a taxa de falhas em um dispositivo, expressa como:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t z(u) du\right) \quad (10)$$

A função de taxa de falha  $z(u)$  utilizada na *eq.(10)*, define o limite da probabilidade de falha de um item num intervalo  $(t, t + \Delta t]$  quando é conhecido que o item está funcionando num tempo  $t$ , dividindo pelo intervalo de tempo  $\Delta t$ , quando esse intervalo tende a zero, de acordo à *eq.(11)*.

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \quad (11)$$

A função de taxa de falha associada a um item é uma função que pode ser obtida experimentalmente, resultando em uma curva denominada “curva da banheira” devido à forma que a caracteriza. Esta função é mostrada na *Figura 7*, no gráfico é possível diferenciar três intervalos fundamentais: período inicial, período de trabalho, e período final. No período de trabalho a taxa de falha é relativamente baixa e praticamente constante, já nos períodos inicial e final as taxas são maiores, decrescendo e crescendo de forma exponencial respectivamente nesses períodos (RAUSAND; HOYLAN, 2004).

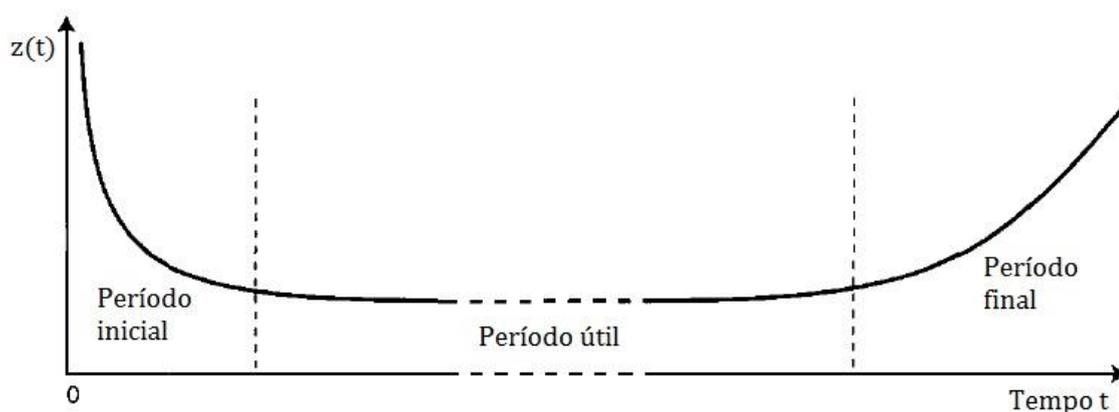


Figura 7 – Representação do tempo de vida de um item até a primeira falha, conhecida como curva da banheira.

Nos estudos de confiabilidade, são amplamente utilizadas distribuições de probabilidade que descrevem com maior precisão o tempo de vida do item avaliado. Algumas das mais conhecidas, principalmente na área de manutenção são: normal, lognormal, Weibull, exponencial e Gamma (WUTTKE; SELLITTO, 2008). A distribuição normal descreve os tempos até falhas originadas por causas acumulativas; a distribuição lognormal, é empregada quando a falha se origina de causas que se multiplicam, formadas na maior parte a partir da corrosão de um componente; a distribuição Weibull, se usa quando várias causas competem e a primeira que ocorre causa a falha, utilizada em sistemas em série; a distribuição exponencial, emprega-se quando a falha ocorre por motivos aleatórios; a distribuição Gamma,

é escolhida quando a última causa que ocorre provoca a falha do item, fazendo referência a sistemas paralelos (BAUER et al., 2009).

De forma geral, as medições de disponibilidade e confiabilidade de sistemas, são proporções associadas aos valores de probabilidades, nas quais se avaliam os históricos de eventos relacionados aos tempos de utilização do item, considerado reparável. No nosso estudo, trataremos a disponibilidade de sistemas como um valor causal, dependente do estado de funcionamento de cada um dos elementos desse sistema. Assim, o valor final vai ser calculado instantaneamente a partir da disponibilidade de cada um dos componentes mais simples do sistema, sem a utilização de dados históricos do funcionamento dos sistemas avaliados.

## **2.5 Principais técnicas de análises de disponibilidade**

As análises de disponibilidade geralmente estão relacionadas à avaliação de outros parâmetros como confiabilidade, manutenção e segurança; indicadores conhecidos pelas siglas em inglês RAMS. Como resultado destas avaliações obtêm-se significativos ganhos nos custos de manutenção e funcionamento com baixos níveis de risco. Dessa forma são assegurados grandes volumes de produção devido à operação contínua dos sistemas (SMITH, 2011).

Com o objetivo de avaliar a disponibilidade e confiabilidade em sistemas industriais têm sido desenvolvidas e adaptadas para esse fim, vários modelos de análises, basicamente classificados em duas categorias: modelos matemáticos ou analíticos e técnicas ou modelos conceituais. A *Figura 8* apresenta alguns dos modelos mais importantes na avaliação de confiabilidade e disponibilidade.

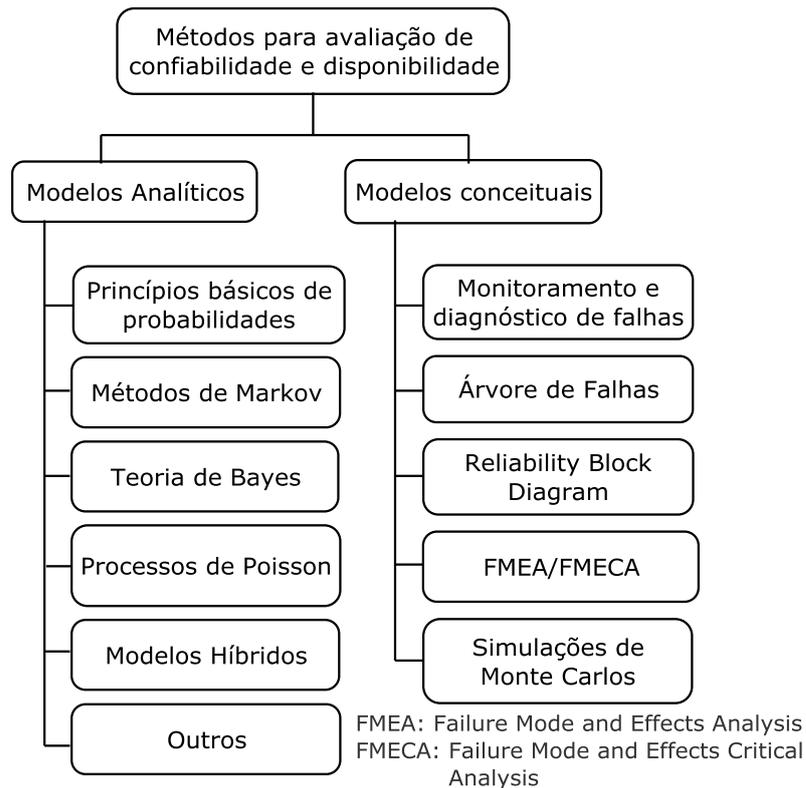


Figura 8 – Metodologias de avaliação de disponibilidade e confiabilidade.

Fonte: Elaborada a partir do modelo apresentado em (SUN, 2006)

As técnicas de avaliação de disponibilidade podem ser classificadas também em técnicas qualitativas ou quantitativas, como apresentado na *Figura 9*. As técnicas qualitativas em sentido geral são mais simples e tem um menor custo de aplicação. Embora não sejam apropriadas para fornecer estimativas numéricas e realizar tratamento de dados estatísticos, são métodos com ótimos resultados quando existe incerteza nos dados avaliados. Em oposição às técnicas quantitativas tem maior complexidade e custos de implementação. Estas metodologias são desenvolvidas para oferecer resultados numéricos dos problemas abordados.

De acordo às características próprias, ambos os grupos de metodologias são empregados nas análises de segurança para obter resultados específicos. As abordagens qualitativas são encarregadas de identificar e ilustrar mecanismos que possam originar falhas do sistema, sendo que estes mecanismos agrupam situações como: falha de componentes, fatores ambientais, erros humanos, eventos característicos, etc. Já os enfoques quantitativos têm como objetivo avaliar numericamente o problema analisado, de modo que, nas análises de disponibilidade e confiabilidade esses valores são o reflexo das probabilidades de sucesso na operação do sistema, ou de acontecimentos de eventos indesejados.

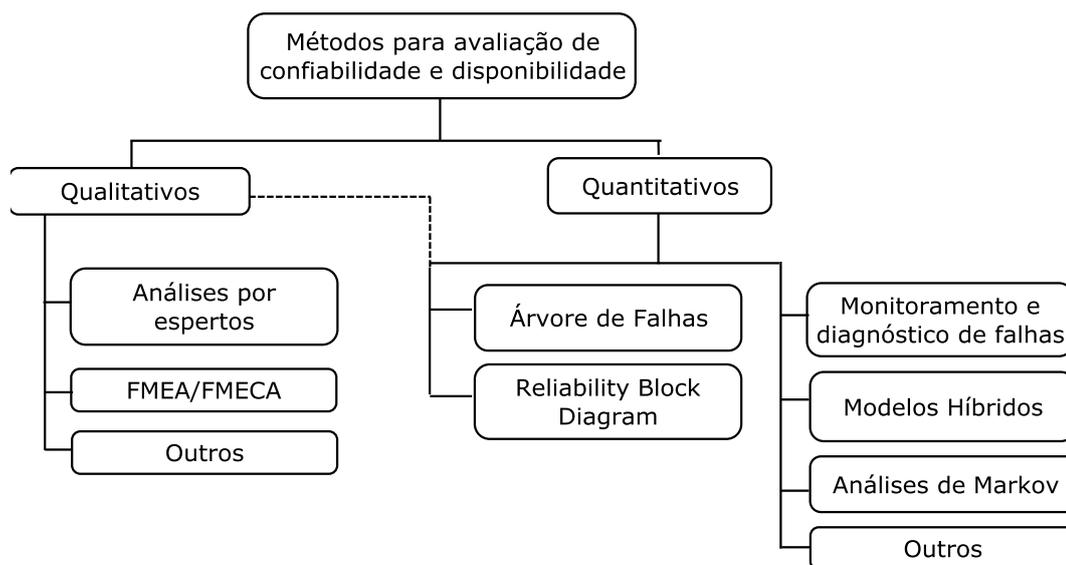


Figura 9 – Algumas das técnicas empregadas na avaliação de disponibilidade e confiabilidade de sistemas industriais.

Fonte: Elaborada a partir do modelo apresentado em (ROUVROYE; BLIEK, VAN DEN, 2002)

Entre os modelos de avaliação de disponibilidade e confiabilidade mais conhecidos e empregados, destacam-se dentro da indústria as abordagens de Markov, Monte Carlo, Árvore de Falhas e Reliability Block Diagram (RBD), cada um deles com vantagens e limitações características dentro de este tipo de análises e os meios onde são utilizados (SUN, 2006).

### 2.5.1 Modelos de Markov

Os modelos de Markov<sup>2</sup>, foram criadas nos inícios do século XX, eles introduzem um tipo especial de processos estocásticos, onde a probabilidade dos estados futuros de um conjunto de elementos vai depender somente dos estados desses elementos no presente. Como consequência disso, estes processos são caracterizados por ter perda de memória, ou seja, eles tem caráter não hereditário (CHING; HUANG, 2013).

O procedimento estocástico Markoviano com estados e parâmetros de tempo discretos é conhecido comumente como cadeia de Markov, sendo um processo homogêneo para intervalos de tempos equidistantes e não homogêneo se as transições entre estados são funções aleatórias de tempo. Na presença de eventos separados por intervalos de tempos contínuos, o método é conhecido como Processos de Markov (FUQUA, 2003).

<sup>2</sup> Nome do matemático Russo Andrei A. Markov (1856-1922), criador da teoria.

As cadeias de Markov consideram a ocorrência de um conjunto de eventos  $E$ , definidos como:  $\{E_N, N=0,1,2,\dots\}$ , sucedidos em intervalos de tempos discretos  $k$  com valores  $\{0,1,2,\dots\}$  sendo  $k$  um número finito na maior parte das aplicações. Os eventos  $E_N$  representam os possíveis estados do sistema.

Analisando a etapa  $k+1$  de uma cadeia, a ocorrência de um conjunto de eventos  $\{E_1, \dots, E_N\}$ , vai estar definida por certa probabilidade, a qual depende unicamente da etapa  $k$ . Tomando um evento  $E_i$  de partida em  $k$ , e outro de chegada  $E_j$  em  $k+1$ , a probabilidade de ocorrência define-se como  $p_{ij}$ , sendo  $\{i, j=0,1,2,\dots,N\}$ , e igualmente conhecida como probabilidade de transição, a qual satisfaz a condição:

$$P_{ij} \geq 0, \quad \sum_j P_{ij} = 1, \quad i=1,2,\dots,N$$

O conjunto de valores de probabilidade definidos por  $P_{ij}$  representa uma matriz quadrada de ordem  $N$ , conhecida como matriz de transição do sistema a qual tem a seguinte forma:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,N} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N,0} & P_{N,1} & \dots & P_{N,N} \end{bmatrix}$$

Uma representação por grafos ajuda a ter uma melhor perspectiva das transições entre os estados sob análises, ver *Figura 10*.

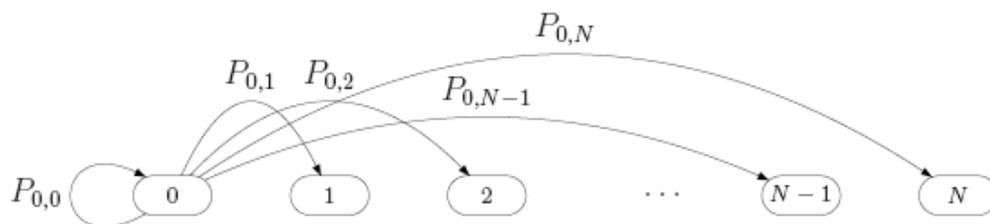


Figura 10 – Grafo da topologia de cadeia formada nas análises de Markov.

Se a probabilidade dos eventos  $\{E_1, \dots, E_N\}$  em um estado  $k$  é denominada como  $\{p_1(k), \dots, p_N(k)\}$ , depois de sucessivas etapas a probabilidade de transição pode se expressa na forma:

$$p_j(k+1) = \sum_i p_i(k) P_{ij}; \quad (12)$$

que pode ser reformulado da seguinte forma:

$$p(k+1) = p(k)\overline{P}; \quad (13)$$

onde  $p(k)$  é um vetor de  $N$  elementos com as probabilidades  $p_1(k), \dots, p_N(k)$ . Definindo um vetor inicial de probabilidades  $p(0)$  de  $N$  elementos, é possível comprovar que:

$$p(k) = p(0)\overline{P}^k \quad (14)$$

Sendo que  $\overline{P}^k$  corresponde à matriz de transição na etapa  $k$ . Estas formulações representam as expressões primárias das cadeias de Markov para o estudo de eventos estocásticos, as quais são comumente empregadas para modelar grande parte dos problemas de predição de disponibilidade em sistemas reparáveis (CHING; HUANG, 2013). Adicionalmente, é possível fazer análises de convergência, a fim de prever o tempo necessário até chegar numa distribuição de probabilidades desejada, em (ROSENTHAL, 1995) é feito um estudo de várias técnicas utilizadas para analisar convergência de cadeias de Markov.

A depender da complexidade do problema abordado, principalmente em sistemas dinâmicos, podem ser utilizados processos semi-markovianos (FUQUA, 2003), nos quais o tempo de permanência no estado atual do processo vai ter uma função de distribuição, a qual depende do estado futuro do processo. Mesmo assim, as análises de sistemas com alto número de componentes, são extremadamente complexas pela quantidade de estados que caracterizam o processo, o que dificulta a construção dos modelos de cálculo, e geralmente conduzem a algoritmos com alto custo computacional.

Em frente destas situações é comum encontrar modelos híbridos de análises de sistemas, nos quais as teorias de Markov são aplicadas em conjunto com outras técnicas, tais como RBD ou Árvores de Falhas, com a finalidade de reduzir o domínio de aplicação, e conseqüentemente as dimensões das matrizes de transição que descrevem os estados do sistema (VERLINDEN; GEERT; COUPÉ, 2012).

### 2.5.2 Métodos de Monte Carlo

O uso de métodos analíticos na avaliação de disponibilidade em algumas situações pode resultar impraticável ou simplesmente impossível. Nestas circunstâncias os métodos numéricos podem ser uma alternativa para avaliar disponibilidade e confiabilidade em sistemas complexos. Uns dos métodos numéricos mais utilizados neste tipo de estimativas são

as simulações pelo método de Monte Carlo, geralmente aplicados na otimização da manutenção em sistemas complexos (MARQUEZ; HEGUEDAS, 2002).

O método de Monte Carlo é caracterizado por simular cenários do comportamento “real” do sistema. O método parte de um modelo do sistema realizado geralmente utilizando RBD ou diagramas de fluxo. Para realizar as simulações, são gerados num modelo computacional, eventos aleatórios associados à falha de um item, eventos programados referentes à manutenção preventiva e eventos condicionais causados por terceiros dispositivos. Uma das características do método de Monte Carlo está precisamente no uso de distribuições de probabilidades para simular as entradas do sistema (BAUER et al., 2009).

Nas simulações de Monte Carlo os valores dos parâmetros de entrada são gerados a cada iteração, levando em conta que cada parâmetro de entrada vai estar representado por uma função de distribuição. Em (CRESPO MARQUEZ et al., 2005) é descrito um procedimento geral para a aplicação de método de Monte Carlo nas análises de disponibilidade em sistemas complexos.

Embora o emprego de métodos de Monte Carlo tenha se incrementado produto do crescimento do poder de processamento dos computadores atuais, resulta extremamente complexo desenvolver algoritmos eficientes para implementar o método, ao mesmo tempo, soluções muito precisas requerem a avaliação de um considerável número de cenários, o que pode originar elevados tempos de cálculo em sistemas de grande porte (DEKKER; GROENENDIJK, 1995).

### 2.5.3 Reliability Block Diagram

Reliability Block Diagram (Diagrama de Blocos de Confiabilidade) é uma metodologia baseada na representação de sistemas e subsistemas em blocos funcionais, interconectados em série, em paralelo, em forma de ponte, etc., de acordo às relações de dependência estabelecidas entre os componentes do sistema (WANG et al., 2004). Nesse sentido a disponibilidade do sistema vai ser estimada a partir da disponibilidade de cada um dos seus componentes funcionais.

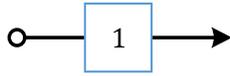
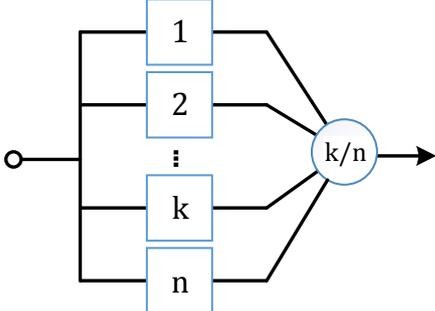
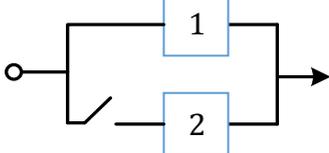
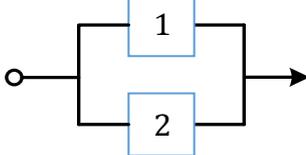
Os blocos utilizados no RBD para representar os sistema e subsistemas, geralmente são planejados de forma que caracterizem os elementos que estão representando (BOUROUNI, 2013). Por outro lado a disponibilidade depende da topologia de interconexão dos elementos utilizada para formar o sistema, os quais são fragmentados até chegar a

pequenas estruturas com modelos de cálculo ou dados já conhecidos. As principais estruturas e as expressões matemáticas para o cálculo de disponibilidade de cada uma das situações possíveis estão resumidas na *Figura 11*.

Um caso particular da configuração de elementos em paralelo é mostrado na estrutura correspondente à redundância  $k$  de  $n$ , na qual o sistema vai funcionar se no mínimo  $k$  elementos do total  $n$  estão funcionando.

Em seções anteriores comentamos as características do funcionamento de dispositivos em série e paralelo, por esse motivo focamos a análise somente em dispositivos com configuração de *stand-by*. Um dispositivo ou sistema é considerado em *stand-by* quando um número grande de componentes idênticos com a mesma função estão sendo usados, de modo que os componentes estão em operação, ao tempo que o elemento em *stand-by* encontra-se em reserva.

O método RBD é geralmente aplicado a sistemas não reparáveis com uma representação matemática associada, de forma que os cálculos podem ser obtidos analiticamente. Para sistemas reparáveis, tais como SEP comerciais e industriais, o RBD não oferece nenhum método computacional para as análises do sistema, simplesmente os cálculos são realizados de acordo à topologia do sistema.

	Elemento simples	$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$
	Redundância $k/n$	$A = \sum_{k=r}^n \frac{C_n^k \mu^k \lambda^{n-k}}{(\lambda + \mu)^n}$
	Stand-by	$A = \frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{2\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$
	Redundância ativa (Paralelo)	$A = \frac{2\mu^2 + 2\mu\lambda}{2\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$

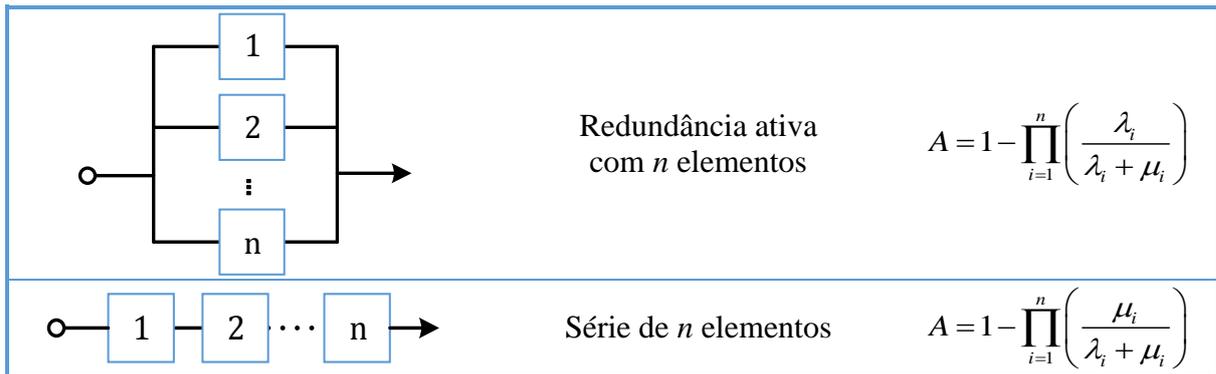


Figura 11 – Principais estruturas e formulações utilizadas pelo método de RBD nas análises de disponibilidade e confiabilidade.

Fonte: Elaborada a partir do modelo apresentado em (BOUROUNI, 2013)

O método RBD possui como principal vantagem, a facilidade de implementação e de compreensão dos diagramas associados a um sistema (WANG et al., 2004).

#### 2.5.4 Árvore de falhas

As análises por árvore de falhas foram originalmente desenvolvidas nos anos 60 na empresa *Bell Telephone Laboratories* para realizar análises de segurança em sistemas de mísseis. A partir desse momento a metodologia foi estendida a todo o sistema aeroespacial e introduzida nas análises de segurança da maior parte dos sistemas industriais. Este método está baseado na construção de um diagrama de árvore que possibilita determinar possíveis combinações de falhas que possam levar a indisponibilidade de um sistema ou causar algum tipo de acidente. Adicionalmente a metodologia pode ser empregada no cálculo de probabilidades de falha do sistema, e de forma geral, pode ser utilizada em enfoques qualitativos ou quantitativos.

O diagrama de árvore de falhas representa os relacionamentos lógicos entre os elementos físicos ou eventos do sistema, este diagrama é construído a partir três tipos de simbologias (BOUROUNI, 2013):

- símbolos de eventos primários e intermediários;
- comportas lógicas;
- símbolos de transferência;

dos quais as comportas lógicas são mais frequentemente utilizadas, sendo as comportas AND, utilizadas para conectar eventos e condições, e as comportas OR, representam a ocorrência de caminhos geralmente redundantes. A *Figura 12* mostra um diagrama simples de Árvore de

Falhas, construído a partir do subsistema da *Figura 4c*, onde os elementos A, B e C vão ter um evento de falha associado.

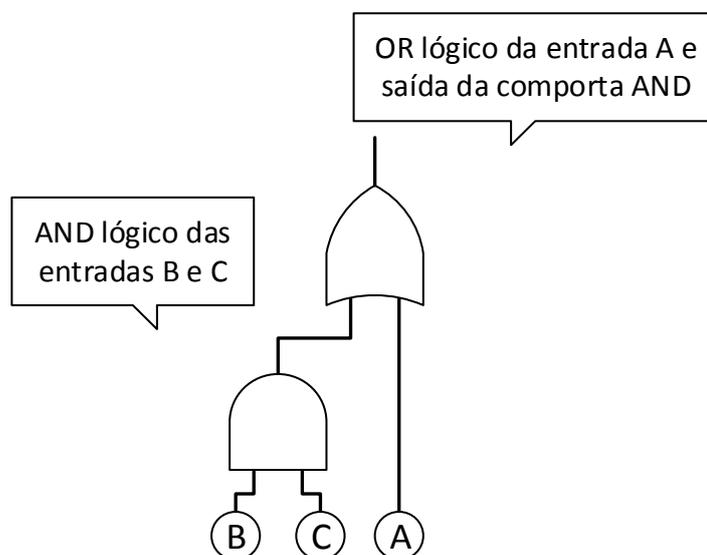


Figura 12 – Representação em Árvore de Falhas da estrutura mostrada na *Figura 4c*.

Na árvore de falhas, o caminho desde o evento até a condição de falha é conhecido como conjunto de corte ou “*Cut Set*”. O menor caminho entre um evento determinado até a falha do sistema é conhecido como “*minimal cut set*”, e a partir dessas combinações é possível identificar os pontos frágeis do sistema. Uma das principais desvantagens de utilizar análises por árvore de falhas está na limitada capacidade do modelo de incorporar conceitos como manutenção e reparo, associados às distribuições que simulam o tempo de vida de um item.

Em sínteses, os desenvolvimentos baseados nos simulações de Monte Carlos e modelos de Markov são metodologias que requerem de um vasto conhecimento da área. Em tanto os métodos RBD e Árvores de Falhas requerem de dados históricos exaustivos de eventos e probabilidade de falhas dos componentes do sistema para oferecer resultados precisos (VESELY et al., 1981).

## 2.6 Resumo do capítulo

Neste capítulo foi realizada uma introdução aos sistemas elétricos de potência, tendo como foco as Usinas de Hidrelétricas, das quais mostraram-se possíveis configurações e representações básicas, que servirão futuramente no trabalho para avaliar as metodologias de análises de disponibilidade apresentadas nos próximos capítulos.

Foram introduzidos também alguns dos critérios de análises de riscos e avaliação de segurança em sistemas industriais, assim como algumas das principais técnicas de confiabilidade e disponibilidade, comumente empregadas na avaliação de sistemas com alto perigo de funcionamento.

### **3 MÉTODO DE MATRIZ DE DEPENDÊNCIAS**

Quando se está em presença de sistemas industriais complexos, onde o número de elementos ou dispositivos é muito elevado, as análises de ocorrências de falhas em dispositivos simples ou as repercussões envolvidas após um evento indesejado, resulta um trabalho complexo para operadores e analistas encarregados de operar e manter estes sistemas. Dado o grande volume de informação que é necessário processar, e a importância de escolher as melhores estratégias de manutenção e operação é desejável contar com métodos e ferramentas computacionais que auxiliem no processo decisório.

No capítulo anterior foram discutidas um grupo de questões relacionadas a sistemas elétricos de potência, riscos, segurança, análises de disponibilidade em sistemas, e algumas das metodologias de análises de disponibilidade e confiabilidade com maior aceitação nessa área. Neste capítulo vai ser apresentada uma metodologia qualitativa utilizada para avaliar disponibilidade em sistemas industriais, especificamente em usinas hidrelétricas, tomando como foco para a descrição e análises do método a representação simplificada da UHE já estudada no *Capítulo 2*, e ilustrada no diagrama da *Figura 3*.

O estudo e desenvolvimento do MMD teve sua origem nas análises de configurações críticas em sistemas perigosos, utilizando a avaliação qualitativa de sistemas representados mediante matrizes de dependências. A abordagem foi inicialmente desenvolvida para centrais nucleares, e aplicada na central nuclear de Embalse (VALLE; OJEDA, 2010). O método, de enfoque indutivo, tem por objetivo realizar uma descrição qualitativa do sistema abordado, de forma que o resultado da avaliação possa ser apresentado de forma rápida e concisa.

Em sínteses o MMD é uma técnica qualitativa que estuda o comportamento de sistemas e subsistemas industriais a partir dos estados lógicos dos elementos mais simples. O método tem base nas análises e propagações dos estados nos dispositivos que formam o sistema em questão, mediante cadeias de elementos representados numa matriz de dependências, formadas de acordo a uma estrutura de árvore, que logicamente, vão convergir no topo da estrutura, ao elemento que representa o estado geral do sistema avaliado.

### 3.1 Definição de Matriz de Dependências

Inicialmente ilustramos a interpretação considerada neste trabalho para as categorias de dependências e influência, entre componentes, subsistemas e sistemas de uma usina.

As dependências e influências dentro de uma matriz são tratadas como as relações funcionais entre os elementos do sistema, de forma tal que, um elemento A vai ser dependente de um elemento B, caso uma falha de esse último elemento B provoque uma falha no primeiro elemento A, ou seja, o comportamento do elemento B influencia o estado do elemento A.

A relação estabelecida entre os elementos A e B, é uma *dependência direta*. Supondo que exista um terceiro elemento C que influencia o elemento B, o elemento A que depende de B vai ser dependente de C, de forma tal que a relação entre os elementos A e C é uma *dependência indireta*. Sendo que em uma relação de dependência indireta pode existir um ou mais elementos intermediários.

O termo de matriz utilizado no nome do método, deriva da estrutura utilizada para a representação e armazenamento dos componentes, subsistemas e sistemas. Elas são uma reprodução dos estados de disponibilidade de dispositivos, subsistemas e sistemas de um complexo industrial, estruturadas de acordo as relações de dependências funcionais estabelecidas entre esses elementos, e representadas numa estrutura matricial.

Para compreender o funcionamento destas estruturas lógicas é preciso detalhar cada um dos elementos que conformam uma matriz de dependências, os quais são analisados nesta seção. Das análises dos elementos presentes nas matrizes de dependências, pode-se deduzir que os componentes armazenados nestas estruturas vão estar funcionalmente relacionados uns com outros, formando uma representação matricial de  $a$  linhas por  $b$  colunas, ver *Tabela 2*, com a singularidade de que o número de elementos de cada linha não necessariamente corresponde com número total de colunas, característica que deu lugar à escolha das

estruturas de dados utilizadas para representar de forma otimizada as matrizes de dependências, e apresentadas no *Capítulo 4*.

Tabela 2 – Matriz de dependências associada à representação simplificada da UHE ilustrada na *Figura 3*.

Nr	Equipamento	Dependências			
		@RES1	@NODO	@RES2	@TR
1	@SM				
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
3	@RES1	NIV1	NIV2		
4	@RES2	NIV3	NIV4		
5	@TR	VOLG			
6	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
7	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
8	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
9	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
10	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
11	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
12	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
13	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
14	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
15	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
16	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
17	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

Em princípio uma matriz de dependências pode conter uma representação parcial ou total dos elementos ativos de um sistema industrial. Estes elementos são divididos em dois conjuntos, diferenciados pelo uso do caractere “@” e a posição que cada elemento ocupa dentro da matriz, a qual é ordenada de acordo a níveis hierárquicos pré-estabelecidos pela estrutura do sistema.

O primeiro dos grupos, aqueles que não são identificados com o caractere “@”, é composto pelos Componentes de Baixo Nível (CBN), e contêm os estados dos elementos físicos do sistema que não podem ser divididos (componentes), estes elementos geralmente ocupam lugares hierarquicamente inferiores dentro da matriz de dependências. Entretanto o segundo conjunto, aqueles que são identificados pelo caractere “@”, é constituído pelos Componentes de Alto Nível (CAN). Estes elementos são formados pela agrupação de vários CBNs, CANs, ou a combinação de esses dois conjuntos, e representam os estados de sistemas e subsistemas que formam o sistema analisado, ver *Tabela 2*.

O cabeçalho da matriz de dependências tem os critérios referentes às informações gerais da tabela, são eles: “Nr”, empregado para identificar os subsistemas da matriz, onde

opcionalmente pode ser utilizado o número do nível hierárquico do subsistema, a coluna “Equipamento”, contém todos os CANs do sistema, e as colunas “Dependências”, armazenam todos os componentes relacionados ou que influenciam o estado do CAN associado à linha correspondente. Como já foi dito, esses elementos estão formados por CBNs ou outros CANs de níveis inferiores.

A relação funcional entre elementos dependentes e influenciadores é estabelecida em cada linha da matriz de dependências, onde os componentes das colunas “Dependências” influenciam o CAN da coluna “Equipamento”, ao tempo que este elemento pode aparecer novamente como dependência de outro CAN de nível hierárquico superior. Dessa forma vai se estabelecendo uma relação de camadas entre os subsistemas da matriz que pode ser representada mediante uma estrutura de árvore. A *Figura 13* mostra as relações de dependência e os níveis para os elementos da UHE mostrada na *Figura 3*.

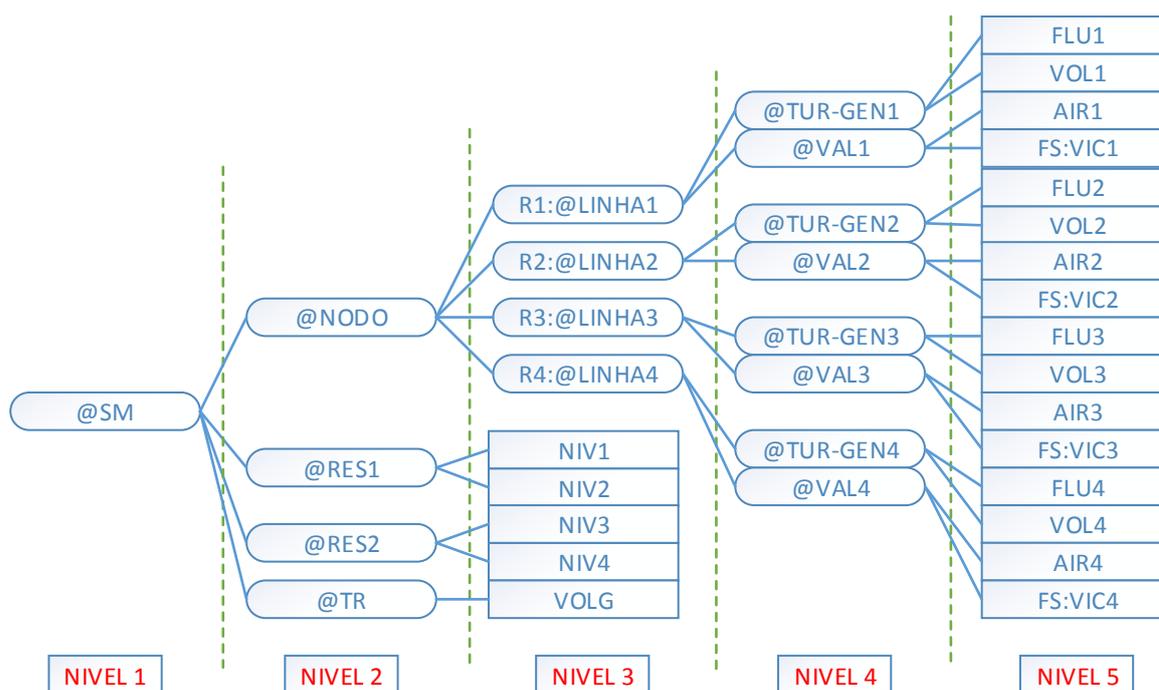


Figura 13 – Estrutura de árvore correspondente aos elementos da representação simplificada da UHE mostrada na *Figura 3*.

Um componente ou item com influência múltipla é um outro tipo de estrutura presente em alguns sistemas. O emprego deste tipo de mecanismos é pouco frequente, devido a que o paradigma de construção de sistemas perigosos favorece a utilização de elementos redundantes. A representação de itens com influência múltipla dentro da matrizes de

dependências é projetada de forma que o item aparece representado tantas vezes quanto o número de elementos que ele influencia.

Dentro da matriz de dependências, os elementos representados numa linha, tem uma relação serial que explica a falha do componente que eles influenciam, caso algum deles falhe. Nos casos em que aparecem elementos redundantes dentro da linha, esses componentes vão funcionar em paralelo, e vão ter o prefixo “R $i$ ” no código identificador, sendo o valor de  $i$  um número inteiro que varia de acordo com o número de redundâncias presente em uma mesma linha da matriz de dependências (MOREIRA et al., 2013); a depender do número de redundâncias, a disponibilidade resultante entre esses elementos vai ser tratada como uma estrutura  $k$  de  $n$ , similar à apresentada no RBD, no *Capítulo 2*. Aqueles componentes que possuem o mecanismo de falha segura possuem “FS” como prefixo do seu código identificador (DOMINGUEZ et al., 2012).

### 3.2 Escala qualitativa de disponibilidade

Os sistemas analisados no presente trabalho são caracterizados por ter um estado inicial que define todos os elementos CBN como disponíveis, ou funcionando corretamente. Então, um elemento CBN ficará indisponível, após sofrer uma falha que impossibilite o componente realizar a função para a que foi projetado.

Os CBN considerados pelo MMD funcionam de acordo a um regime de trabalho que pode ser descrito apenas pelos estados disponível ou indisponível de um elemento. Já nas análises do comportamento dos CANs, são incorporados outros estados para descrever o funcionamento do CAN, estes novos estados estão relacionados com a aparição de elementos redundantes nas suas dependências.

Partindo do estado inicial onde todos os elementos do sistema estão disponíveis e atendendo aos argumentos anteriormente expostos, para representar a disponibilidade de cada um dos elementos do sistema, é utilizada uma escala de cores que representa estados qualitativos. As cinco categorias usadas na representação correspondem aos seguintes critérios: disponível, falha segura, degradado, muito degradado e indisponível, conforme *Figura 14*.

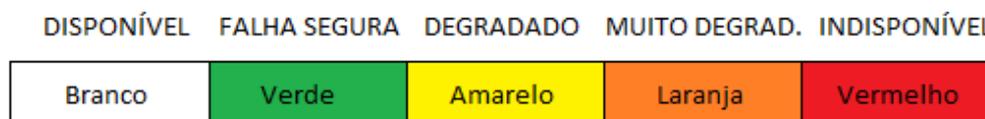


Figura 14 – Escala qualitativa de disponibilidade utilizada no MMD.

De acordo à *Figura 14*, cada uma das categorias recebe uma cor diferente, sendo branco para disponível, verde para falha segura, amarelo para degradado, laranja para muito degradado e vermelho para indisponível. O significado de cada um desses estados é descrito a seguir:

- Disponível: indica que o sistema (CAN) ou componente (CBN) está em estado operativo;
- Falha segura: quando algum componente falhou e o mecanismo de falha segura foi ativado;
- Degradado: indica que existe uma situação de falha, ou elemento fora de serviço entre os componentes redundantes que influenciam o sistema, e de acordo ao critério de disponibilidade a falha de outro elemento redundante não conduz à indisponibilidade do sistema;
- Muito degradado: estado de alto perigo que mostra uma linha da MD com o limite de componentes redundantes em falha, na qual, caso outra dependência redundante falhe, provoca a indisponibilidade do CAN correspondente;
- Indisponível: indica uma configuração que caracteriza a falha de um componente do sistema ou do próprio sistema.

A atribuição das categorias qualitativas está relacionada ao critério de sucesso ( $k/n$ ), definido como o número de elementos  $k$ , entre  $n$  elementos redundantes, necessários para um subsistema (linha da MD) se encontrar disponível. Considerando  $m$  como o número de elementos disponíveis, então:

- se  $m < k$ , o sistema está indisponível,
- se  $m = n$ , o sistema está disponível.

As categorias qualitativas degradado e muito degradado para o intervalo de  $k \leq m < n$ , definem-se a partir do intervalo definido pelos elementos de reserva ( $n - k$ ), de modo que:

- se  $(n - m) \leq \frac{(n - k)}{2}$ , o sistema está degradado,
- se  $(n - m) > \frac{(n - k)}{2}$ , o sistema está muito degradado.

### 3.3 Propagação de dependências no MMD

Uma vez construída a matriz de dependências do sistema e estabelecida à escala qualitativa de disponibilidade, devemos contar com mecanismos que permitam avaliar o impacto da falha de um ou mais CBNs na disponibilidade dos sistemas. Estes mecanismos são chamados de algoritmos de propagação das dependências. A propagação de estados de indisponibilidade é realizada mediante a aplicação de dois algoritmos, varredura direta e varredura indireta. Os algoritmos de varredura propostos por (VALLE; OJEDA, 2010), tinham natureza recursiva, com custo computacional exponencial. Sendo a principal contribuição deste trabalho otimizar os algoritmos de varredura para aumentar o desempenho do MMD.

A partir dos mecanismos de dependência direta e indireta, pode-se deduzir que a relação funcional entre elementos de níveis inferiores e superiores é constituída por uma cadeia de vários elementos com relações de dependência. Os quais, caso de existir uma falha, vão provocar um impacto que se propaga de elemento em elemento até atingir o último item desta cadeia. Desta forma é definida a propagação de estados de disponibilidade dentro de uma matriz de dependências.

Então, os algoritmos de varredura, direta e indireta, são os encarregados de realizar a propagação das dependências dentro da matriz. Estas varreduras executam-se levando em consideração que inicialmente todos os componentes da matriz de dependências encontram-se disponíveis, e partir dos dados de falha ou indisponibilidade recebidos como parâmetro no vetor de estados, a matriz de dependências é percorrida alterando os estados de cada item relacionado aos itens afetados no começo da varredura. Considerando no processo as relações funcionais dos componentes, a escala qualitativa de disponibilidade, e os critérios de dependências e redundâncias mencionados anteriormente.

A varredura da matriz de dependências para a análise de disponibilidade do sistema, é feita em duas etapas:

- (i) varredura simples ou direta;

- (ii) varredura complexa ou indireta.

### 3.3.1 Varredura simples ou direta

A primeira etapa do algoritmo executa a varredura direta, na qual a matriz de dependências vai ser percorrida no sentido *Top – Down*, ou seja, das linhas superiores às inferiores, em busca dos CBNs indisponíveis indicados pelo vetor de estados. Geralmente os CBNs estão localizados nas linhas inferiores da matriz de dependências.

Ao tempo que os elementos são encontrados e marcados como indisponíveis é feita a primeira propagação associada às dependências diretas, que ocorre dentro da própria linha do elemento propagando a falha, até o CAN influenciado por ele, localizado na coluna de Equipamentos. O processo de varredura direta tem seu término uma vez que todos os elementos da matriz sejam comparados com os CBNs indisponíveis do vetor de estado, devido a que um elemento pode aparecer como dependência em mais de uma ocasião.

O processo de propagação direta de dependências é controlado pelos critérios de redundâncias já abordados em seções anteriores, de forma tal que em caso de um dos CBNs indisponíveis ser redundante dentro da linha, o estado propagado vai depender do critério de disponibilidade  $k$  de  $n$  da linha, previamente estabelecido pelos analistas de sistemas para esse tipo de situações. O fluxograma correspondente à varredura direta é mostrado na *Figura 15*.

No final do processo de propagação de dependências diretas, todas as linhas foram devidamente analisadas e alteradas de acordo ao estado de disponibilidade de suas dependências. As informações que estavam contidas no vetor de estados foram transferidas para a matriz de dependências e, por esse motivo, ele pode ser descartado. A matriz, por sua vez, apresentará todas as dependências diretas devidamente propagadas.

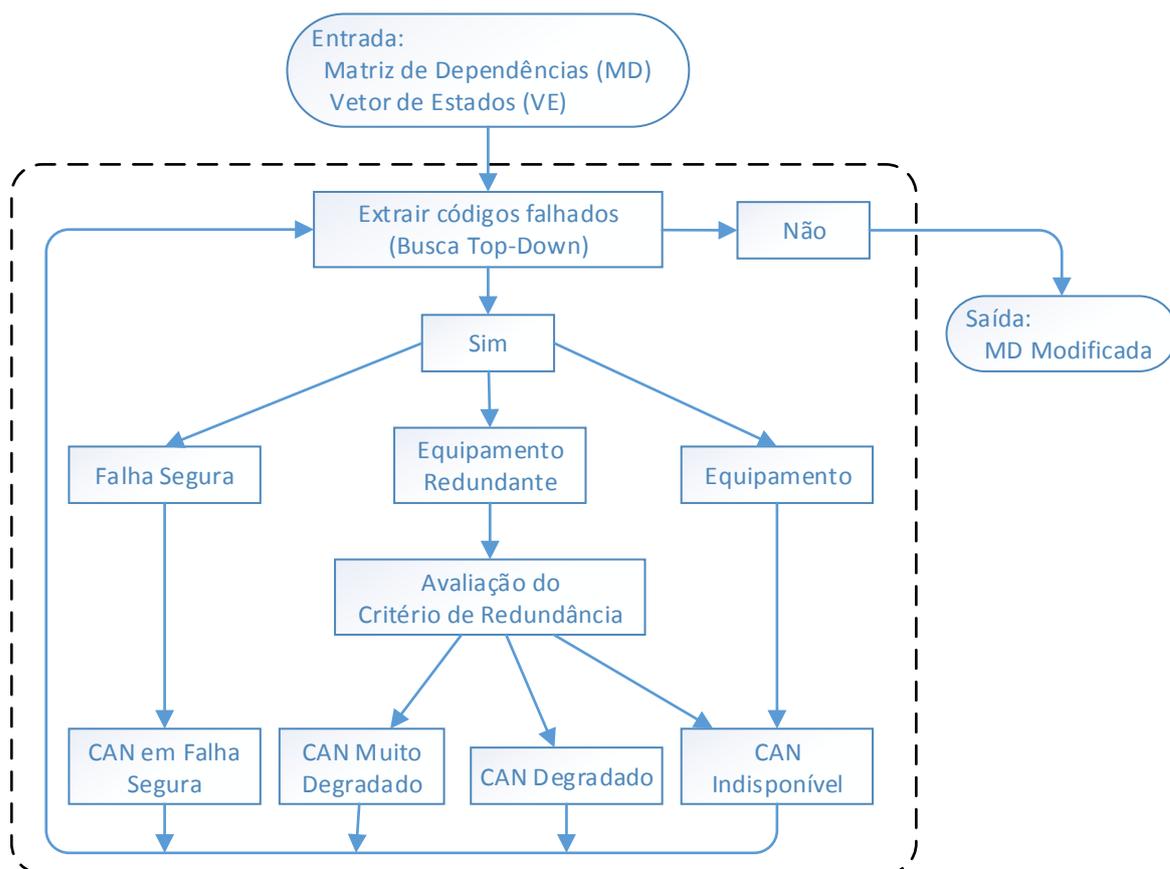


Figura 15 – Fluxograma do algoritmo de varredura direta.

### 3.3.2 Varredura complexa ou indireta

A segunda etapa do algoritmo, denominada varredura indireta ou complexa, tem por objetivo propagar as influências dos CANs já afetados pela varredura direta, entre as diferentes linhas da matriz de dependências, seguindo a cadeia formada pelas relações de dependências indiretas até atingir o CAN hierarquicamente superior na matriz que representa o sistema avaliado.

Agora a varredura da matriz de dependências é realizada de forma *Bottom – Up*, ou seja, das linhas inferiores às linhas superiores. Quando for encontrado um CAN afetado, vai se propagar o estado dele, buscando o elemento nas dependências de outra linha durante um novo percurso na matriz, e afetando o subsistema representado pelo CAN na coluna Equipamentos, o qual governa essa linha. O processo vai continuar até atingir o CAN que representa o sistema em avaliação. Então, se existissem outros CAN afetados que não foram propagados, o processo de varredura indireta é repetido novamente. Durante o processo de propagação das dependências indiretas os elementos já afetados tem que ser atualizados de

acordo com os critérios de disponibilidade e redundância já mencionados anteriormente. A *Figura 16* mostra o fluxograma do algoritmo de varredura indireta.

De forma semelhante à varredura direta, na varredura indireta um CAN pode influenciar diferentes linhas da matriz de dependências, sendo necessário que o processo de varredura complete o percurso da matriz após encontrar a primeira linha afetada. Do ponto de vista computacional o algoritmo de varredura indireta descrito tem caráter recursivo, a propagação de uma dependência indireta pode afetar um ou mais CANs que também deverão ser propagados. Ao final da varredura indireta, os estados dos CANs que se encontravam inicialmente em estados de falha segura, degradado ou indisponível, foram completamente propagados ao longo da matriz.

### 3.4 Avaliação de desempenho dos algoritmos de varredura

A análise de um algoritmo está referida à previsão dos recursos que vão ser necessários para a execução dele. Em geral os recursos mais comumente avaliados são o consumo de memória e o tempo de execução, no entanto acesso memória e largura de banda da comunicação podem contribuir a dar uma medida do desempenho de um algoritmo.

O Consumo de Memória (CM) pode ser facilmente avaliado, e vai depender do número de elementos alocados em memória necessários para realizar as operações básicas do algoritmo. No MMD o consumo vai ser igual ao número total de elementos da matriz de dependências  $n$ , produto do emprego de listas encadeadas, descritas no *Capítulo 5*, para armazenar as estruturas de dados.

$$CM_{MMD} = n ; \quad (15)$$

o valor de  $n$  representa uma cota superior, que pode ser calculada como:

$$n \leq N_{CAN} N_{DEP} ; \quad (16)$$

onde  $N_{CAN}$  é o número de linhas da matriz de dependências, e  $N_{DEP}$  é o número de dependências do CAN de maior complexidade, ou número máximo de dependências.

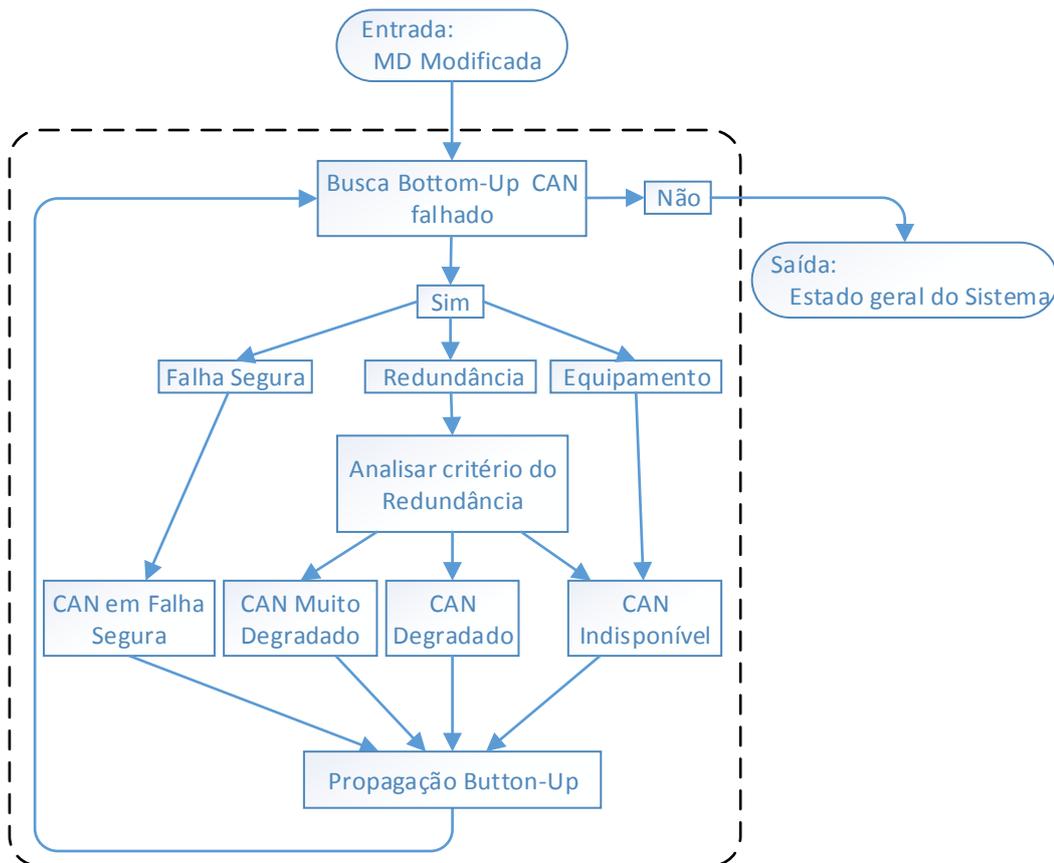


Figura 16 – Fluxograma do algoritmo de varredura indireta

O tempo de execução de um algoritmo de acordo com uma entrada determinada pode ser estimado pelo número de operações primitivas ou “etapas” executadas, sendo estas etapas um período constante de tempo necessário para calcular cada linha do código avaliado (CORMEN et al., 2001).

Dado que as funções de complexidade não avaliam as constantes aditivas e multiplicativas, o tempo de execução do algoritmo pode ser interpretado como o número de vezes que a operação dominante, ou seja, aquela repetida com maior frequência é executada, sendo o resultado do nosso cálculo, um valor que depende da quantidade de elementos de entrada no problema em questão.

Como já foi analisado anteriormente, o algoritmo de varredura direta encargava-se de percorrer a matriz de dependências na direção (*Top – Down*), marcar como indisponíveis cada um dos componentes da matriz contidos no vetor de estados, e propagar seus estados até o CAN que domina a linha onde eles estão posicionados dentro da matriz de dependências.

A avaliação de tempo frequentemente é estudada na base de um limite superior do tempo de execução para qualquer entrada, considerando este limite como o tempo de

execução do algoritmo para o pior caso. Assim o valor obtido vai dar a garantia de que o tempo de execução nunca vai ser superior ao limite de tempo já calculado.

Dessa forma, o Tempo de Execução ( $TE$ ) do algoritmo de Varredura Direta ( $VD$ ) vai ser definido tomando como operação dominante a comparação entre cadeias de caracteres, sendo descrito por uma função linear dependente do número de CANs ou linhas da MD, expressa pela seguinte equação:

$$TE_{VD} = N_{CAN}N_{DEP}N_{FAL} \quad (17)$$

onde os componentes:

- $N_{CAN}$  número de CANs ou linhas da MD;
- $N_{DEP}$  número máximo de dependências da MD;
- $N_{FAL}$  número de elementos do vetor de estados.

As análises de algoritmos acolhem limites assintóticos para estabelecer uma notação padrão que possibilite comparar o desempenho de algoritmos com maior facilidade. Assim as notações  $\Theta$ ,  $O$  e  $\Omega$  (CORMEN et al., 2001), estabelecem respectivamente uma função com limites superior – inferior, superior e inferior, para valores assintóticos da função sob análises, a *eq.(18)* incorpora a notação assintótica superior do tempo de execução da varredura direta na forma

$$TE_{VD} = N_{CAN}N_{DEP}N_{FAL} \Rightarrow O(N_{CAN}) \quad (18)$$

A *eq.(18)* mostra que o algoritmo de varredura direto é linear no número de CANs. O algoritmo de Varredura Indireta ( $VI$ ) no sentido (*Down-Top*) vai propagar cada um dos CANs afetados durante a varredura direta até o elemento mais significativo da matriz de dependências, um de cada vez, de forma tal que a matriz tem que ser percorrida: o número de linhas vezes o número de níveis, por cada item indicado no vetor de estados. Nesta propagação o  $TE$  vai estar definido pela expressão representada na *eq.(19)*, considerando novamente que, a operação principal é a de comparação de cadeias de caracteres.

$$TE_{VI} = N_{CAN}^2 N_{DEP} N_{NIV} N_{FAL} \Rightarrow O(N_{CAN}^3) \quad (19)$$

onde  $N_{NIV}$  representa o número níveis da matriz de dependências. O algoritmo é de complexidade cúbica no número de CANs devido a que o número de dependências vezes o

número de níveis pode ser considerado aproximadamente igual ao número de linhas da matriz:

$$N_{CAN} \approx N_{DEP} N_{NIV} N_{FAL}$$

Finalmente, considerando as *eq.(18)* e *eq.(19)* o algoritmo de varredura (incluindo as duas etapas) tem complexidade cúbica, o que representa um elevado custo computacional, principalmente em análises que envolvem um alto número de CANs. Adicionalmente, ressaltamos que a propagação de dependências deve ser executada cada vez que desejemos avaliar um cenário de disponibilidade.

### 3.5 Algoritmos de ordenação no MMD

Das análises da eficiência nos algoritmos de varredura, podem ser obtidas algumas conclusões importantes. O tempo de execução para algoritmo de varredura direta, no melhor e pior caso vai ser igual, pois ambos os casos vão ter o mesmo número de operações, devido a que o número de percursos à matriz vai ser um, independentemente do número de elementos que tenha o vetor de estados, e o nível de organização que tenha a matriz. As análises do algoritmo de propagação indireta tem comportamento diferente, precisa-se percorrer a estrutura por cada elemento afetado durante o processo com o objetivo de propagar seu estado de disponibilidade. Adicionalmente este grande número de operações terão que ser repetidas sempre que uma nova dependência precise ser propagada pela matriz de dependências, o que leva ao aumento do tempo de processamento utilizado.

Em sistemas pequenos, com algumas dezenas de componentes, questões como a comentada anteriormente podem passar despercebidas, mais em sistemas grandes, com centenas ou milhares de componentes, a situação torna-se mais complexa. Então, será que é possível encontrar alguma solução para diminuir o número de percursos na matriz de dependências na varredura indireta?

A resposta para essa pergunta é afirmativa, e a solução um algoritmo simples e notavelmente mais eficiente. Para isso uma ordenação hierárquica das linhas da matriz de dependências, de forma que no topo da matriz esteja o CAN que representa o sistema, e na sucessão de linhas embaixo dele, estejam ordenados os restantes subsistemas, conforme a hierarquia de cada subsistema dentro da planta, formada a partir das relações de dependências entre seus componentes. Na *Figura 13* é representada a estrutura de árvore correspondente ao modelo simplificado da UHE que vem se utilizado como exemplo ao longo desta dissertação.

O custo do algoritmo de ordenação, como poderá ser analisado nas seguintes seções é similar ao custo do algoritmo de varredura indireta, mais a vantagem está em que depois de ter ordenada a matriz de dependências, este processo só deverá ser realizado novamente quando ocorra alguma mudança na composição ou estrutura do sistema. Dessa forma o algoritmo de varredura complexa pode ser otimizado, sendo necessário de um único percurso na matriz, para propagar todas as dependências indiretas.

### **3.6 Etapas de transição no modelo de varredura**

Analisados os métodos de varredura direta e indireta, foi concluído que a organização da matriz seguindo uma estrutura de árvore, de forma que os CBN estejam nas linhas inferiores e os CAN dominem o topo da estrutura, possibilitaria uma propagação dos estados do sistema com maior rapidez e eficiência. Neste sentido, o estudo e desenvolvimento de soluções para realizar uma implementação eficiente do MMD evoluiu basicamente por três modelos:

- i. O modelo desordenado: constituiu a primeira abordagem do método, desenvolvido para modelar a propagação de elementos indisponíveis nas matrizes de dependências. Esta metodologia foi implantada com base no uso de matrizes onde as linhas podem estar desorganizadas, de forma que o processo de varredura indireta percorre a matriz até encontrar um ponto de convergência dos resultados, assegurando que um novo percurso da matriz não provoca mudanças nos estados de disponibilidade. (VALLE; OJEDA, 2010).
- ii. O modelo com ordenação por influências e dependências: foi uma técnica de transição, com um rendimento superior ao modelo (i), embora apresente deficiências nas análises de alguns sistemas, onde o número de dependências de um subsistema é maior que número de elementos que ele influencia, o que leva a uma ordenação errada da matriz de dependências e, portanto, uma propagação errada de estados de disponibilidade.
- iii. O modelo com ordenação por níveis: é um procedimento de ordenação que estabelece uma classificação das linhas da matriz de dependências, determinada pelo nível hierárquico pertencente a cada linha ou subsistema da matriz, de modo que a linha encontrada no primeiro nível de dependências pertence à representação do sistema (ALFARO; DOMINGUEZ, 2014).

No modelo desordenado a matriz de dependências é percorrida em busca de elementos indisponíveis, e quando algum elemento for encontrado, em outro ciclo é varrida a matriz e propagadas às dependências indiretas até que os elementos “superiores” ou mais significativos da matriz ser atingidos, reajustando em cada propagação os estados dos elementos que já estavam anteriormente afetados por outros dispositivos indisponíveis. Este processo é repetido até chegar num ponto de convergência do estado de disponibilidade do sistema onde uma nova propagação não provoque mudanças nos estados de disponibilidade dos elementos do sistema. Neste enfoque o número de passagens necessárias não pode ser estimado a priori.

Esta proposta tem a vantagem de trabalhar com matrizes onde as linhas apareçam desordenadas; em oposição, o custo computacional produto das reiteradas passagens no processo de propagação das dependências indiretas, tem um peso significativo na escolha do algoritmo para a implementação do MMD.

O modelo analisado a seguir como já foi dito, incorporam um critério de ordenação que possibilita estabelecer uma estrutura hierárquica do conteúdo da matriz de dependências, de forma que os CAN ou linhas com maior peso ou importância no sistema estejam no topo da matriz e os elementos de menor peso na base dela, segundo a estrutura de árvore apresentada no diagrama da *Figura 13*. Tendo esta característica, estes novos métodos vão ter um algoritmo de propagação de dependências indireta mais simples.

A ordenação por influências e dependências foi um método de transição, produto que a pesar de possibilitar um melhor desempenho nos algoritmos de varredura do MMD, apresenta algumas deficiências na ordenação de linhas de sistemas como o apresentado na *Tabela 3*, o que poderá ser apreciado nas seguintes análises.

O algoritmo de ordenação que deu origem a este modelo está baseado na busca do número de influências e dependências associadas aos CANs do sistema, dentro da matriz de dependências. Desta forma é possível obter um peso  $P(x)$ , que identifica a posição da linha dentro da matriz, calculado mediante a diferença entre o número de dependências que uma linha possui  $N_D(x)$ , e o número de CAN que a linha influencia  $N_I(x)$ ; o peso expressa-se como,

$$P(x) = N_D(x) - N_I(x) . \quad (20)$$

Na implementação da ordenação, o modelo pré-estabelece quatro diretivas de prioridade a serem seguidas no momento de comparar as linhas. De forma tal que, vai ser colocada primeiro a linha com maior peso. Caso as linhas tenham pesos iguais, devem ser consideradas as seguintes diretivas na ordem apresentada abaixo, até atingir o último critério. Estas diretivas são:

- i. peso associado a cada linha da matriz  $P(x)$ ;
- ii. número de dependências da linha ( $N_D$ );
- iii. caso existir dependência mutua entre ambas as linhas é colocada primeiro a linha dependente e logo a que influencia;
- iv. ordem alfabético no código do CAN.

A aplicação deste algoritmo, na maior parte das matrizes avaliadas, teve bons resultados, mais existem casos nos quais o peso de uma linha, hierarquicamente inferior a outra, pode ser maior, dado que o cálculo de  $P(x)$ , peso da linha, somente está sujeito às dependências e influências da linha analisada. Se hipoteticamente modificássemos a matriz de dependências da *Tabela 2*, de forma que, eliminamos as últimas oito linhas, e passamos os CBNs a influenciar diretamente nos subsistemas superiores, a matriz de dependências resultante teria a forma mostrada na *Tabela 3*.

Tabela 3 – Linhas da matriz de dependências associada à representação simplificada da UHE ilustrada na *Figura 3* com diferentes valores de  $P(x)$ .

Nr	$P(x)$	Equipamento	Dependências			
			@ RES1	@NODO	@RES2	@TR
1	4	@SM	@ RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	3	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
3	1	@RES1	NIV1	NIV2		
4	1	@ RES2	NIV3	NIV4		
5	0	@TR	VOLG			
6	2	@LINHA1	FLU1	VOL1	AIR1	FS:VIC1
7	2	@LINHA2	FLU2	VOL2	AIR2	FS:VIC2
8	2	@LINHA3	FLU3	VOL3	AIR3	FS:VIC3
9	2	@LINHA4	FLU4	VOL4	AIR4	FS:VIC4

Analisando a *Tabela 3*, as linhas com  $P(x) = 2$ , deveriam ocupar posições superiores às linhas com  $P(x) = 0$  e  $P(x) = 1$ , de acordo aos critérios de ordenação por dependências e influências descritos acima. No entanto essas linhas são hierarquicamente inferiores, pelo que o peso  $P(x)$  não pode ser utilizado como critério para a ordenação das linhas de matrizes de dependências com características similares à apresentada na *Tabela 3*. Visando resolver

problemas como o da situação anterior, e procurando aumentar a eficiência dos critérios de ordenação, foi desenvolvido um novo modelo chamado de ordenação por níveis.

O procedimento de ordenação por níveis estabelece uma única chave de classificação das linhas da matriz de dependências, determinada pelo nível hierárquico pertencente a cada CAN, e utiliza-se o tradicional algoritmo de classificação *QuickSort* (Ordenação Rápida), baseado no paradigma de divisão e conquista.

Das análises da estrutura de árvore da matriz de dependências, ver *Figura 13*, pode-se concluir que este critério de níveis é único para cada elemento de um galho da árvore, com a possibilidade da existência de várias linhas com um mesmo nível, as quais vão ser organizadas em ordem alfabética dado que não existem relações de dependência entre elas.

O modelo em questão, atribui um nível  $N_{NIV}$  a cada linha, sendo  $N_{NIV}$  um número inteiro no intervalo de 1 até o número máximo de níveis alcançados na estrutura de árvore criada com todos os elementos do sistema. O nível hierárquico, pai-filho, é estabelecido de acordo às relações de dependência da matriz, sendo que o elemento que representa o sistema, o qual não influencia a nenhum outro componente e encontra-se no topo da árvore de dependências, vai ter o nível 1. Os elementos dependentes dele vão ter o nível 2, os elementos dependentes dos de nível 2 vão ter nível 3, e assim por diante até atingir a última linha da matriz, como apresentado na *Tabela 4*.

O primeiro passo do processo de ordenação por níveis é a pesquisa do Primeiro Elemento (*PE*) ou raiz da árvore criada a partir da matriz de dependências. Dessa forma, a operação dominante vai ser a comparação entre cadeias de caracteres. O tempo de execução resultante do algoritmo de busca vai ser definido como uma expressão quadrática de acordo à *eq.(21)*

$$TE_{PE} = N_{CAN}^2 N_{DEP} \Rightarrow O(N_{CAN}^2) . \quad (21)$$

Depois de ter encontrado o primeiro ou os primeiros elementos das árvores, devido a que podem existir várias árvores dentro de uma mesma matriz de dependências, o seguinte passo é atribuir um nível a cada uma das restantes linhas mediante um percurso da matriz. O tempo empregado nesta segunda etapa de cálculo de níveis ( $TE_{CNIV}$ ) está dado pela *eq. (22)*.

$$TE_{CNIV} = (N_{CAN} N_{DEP})^2 = n^2 \Rightarrow O(n^2) \quad (22)$$

onde  $n$  representa o número total de elementos da matriz de dependências. Na tabela 4 mostramos a matriz de dependências da usina genérica, utilizada para ilustrar os fundamentos do MDD, com o nível correspondente a cada CAN.

Tabela 4 – Matriz de dependências associada à representação simplificada da UHE ilustrada na *Figura 3* com os níveis de dependência de cada linha.

Nível	Nr	Equipamento	Dependências			
1	1	@SM	@PRE1	@NODO	@PRE2	@TR
2	2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	3	@PRE1	NIV1	NIV2		
2	4	@PRE2	NIV3	NIV4		
2	5	@TR	VOLG			
3	6	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	7	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	8	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	9	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	10	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	11	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	12	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	13	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	14	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	15	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	16	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	17	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

O último passo, consiste na aplicação do método *QuickSort* para ordenar as linhas da matriz. Esta é uma das metodologias de ordenação mais utilizadas e rápidas entre as conhecidas, utilizada em um amplo número de problemas. Especificamente neste trabalho foi empregada à implementação iterativa deste algoritmo de ordenação.

O tempo de execução para o algoritmo do *QuickSort* (*QS*) é conhecido. De igual forma que os algoritmos analisados anteriormente, para o pior caso ele tem um desempenho quadrático de acordo à notação assintótica, como pode ser apreciado na eq.(23).

$$TE_{QS} = \frac{3N_{CAN}^2}{2} + \frac{9N_{CAN}}{2} \Rightarrow O(N_{CAN}^2) \quad (23)$$

Em particular, a operação dominante no algoritmo de ordenação é a comparação de números inteiros, a qual, em sentido geral requer um menor tempo para ser executada em detrimento da comparação de cadeias de caracteres, pois esta requer um maior número de ciclos de relógio para ser executada.

Depois de ordenar a matriz de dependências, o algoritmo de varredura indireta (*Down-Top*) pode ser reestruturado para realizar um único percurso na matriz. Na matriz ordenada durante a propagação indireta, um CAN afetado apenas irá a influenciar as linhas da matriz acima de sua posição, com isso percursos sucessivos não são mais necessários. A análise de tempo empregada para a varredura indireta neste caso vai estar representado pela eq.(24).

$$TE_{VI} = N_{CAN}N_{DEP} \Rightarrow O(N_{CAN}) \quad (24)$$

Como pode ser apreciado, um ganho significativo em tempo de execução surge depois de aplicar a ordenação por níveis à matriz de dependências, produto que a varredura indireta transita de um algoritmo cúbico a outro linear, mantendo-se constante o tempo de execução da varredura direta. No tempo de execução final não são considerados os custos do algoritmo de ordenação e cálculo de níveis, já que estes apenas serão executados uma vez, ou quando existam câmbios na matriz de dependências, situação que acontece esporadicamente nos sistemas estudados.

### 3.7 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos do Método de Matriz de Dependências, metodologia adaptada para analisar disponibilidade em sistemas de geração hidrelétrica. O modelo foi baseado no uso das matrizes de dependências para representar a estrutura do sistema, e utilizando algoritmos de varredura são propagados os estados de indisponibilidade dos elementos falhados, a fim de conhecer o estado de disponibilidade resultante de cada subsistema e do sistema baixo supervisão. A metodologia recreada tem um caráter qualitativo, derivado da escala de cinco cores utilizada para representar os estados de disponibilidade dos elementos do sistema.

No capítulo foram introduzidos também, os princípios de representação de um sistema na matriz de dependências, assim como vários algoritmos de propagação de estados de disponibilidade. Foi introduzido o princípio de ordenação por níveis das linhas da matriz de dependências, baseado na disposição hierárquica do elemento no sistema. O uso da ordenação permite criar algoritmos de varredura mais simples e eficientes, sendo esta a principal contribuição deste trabalho em relação ao MMD.

## **4 MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DE MARKOV**

No capítulo anterior foi introduzida uma metodologia qualitativa de análises de disponibilidade, a qual representa o sistema avaliado numa matriz de dependências, e expressa o estado de cada item de acordo a uma escala de cores que transita por cinco estados de disponibilidade. O processo de análises de disponibilidade é realizado seguindo um conjunto de heurísticas que fazem possível conhecer o estado global do sistema a partir do estado de cada um dos seus componentes.

Este capítulo introduz um novo modelo de análises de disponibilidade, onde, da mesma forma ao método anterior, o estado final do sistema vai ser obtido a partir do conhecimento de cada um dos estados dos componentes mais simples do sistema. Em oposição, este modelo utiliza uma escala numérica de disponibilidade e o cálculo do estado geral do sistema é realizado utilizando um processo iterativo e expressões matemáticas, que foram inspiradas nas análises de disponibilidade utilizando propagações de Markov. Dessa forma, este modelo, denominado Método de Propagação de Markov (MPM), proporciona uma análises quantitativa de disponibilidade do sistema estudado.

### **4.1 Fundamentos do Método de Propagação de Markov**

O desenvolvimento do MPM está baseado na ideia de reaproveitar as estruturas de matrizes de dependências empregadas no MMD, e avaliar a disponibilidade dos sistemas com um maior grau de precisão. Com este objetivo, para representar a disponibilidade se utiliza uma escala numérica contínua com valores definidos no intervalo  $[0,1]$ , onde 0 indica que um elemento está totalmente indisponível, e 1 implica a disponibilidade total do elemento.

A ideia do arcabouço do MPM foi trazida das análises realizadas em sistemas biológicos apresentadas em (MOSQUEIRA et al., 2000, 2012), especificamente baseada na teoria clássica de cadeias de Markov introduzida na *Seção 2.5.1*, onde é proposto o cálculo de

um vetor de probabilidades num instante de tempo  $k+1$ , a partir da combinação de uma matriz de transição com o vetor num instante de tempo  $k$ , conforme à eq.(13).

A proposta do MPM consiste na criação de uma matriz de transição a partir dos elementos do sistema, representados numa matriz de dependências, de forma que a aplicação iterativa no tempo sobre um vetor inicial de estados de disponibilidade, após a ocorrência de uma falha, vai convergir aos valores de disponibilidade do sistema. Geralmente uma falha provoca variações na disponibilidade dos elementos mais simples ou CBNs desse vetor. A seguir descrevemos a formatação proposta para o MPM.

A partir do modelo de matriz de dependências associado a um sistema, apresentado na *Seção 3.1*, o MPM constrói quatro estruturas de dados, compostas por: uma matriz de dependências associada, um vetor de estados, um operador de dependências em série e um operador de dependências em paralelo. Todos eles necessários para realizar o cálculo de disponibilidade (DOMINGUEZ et al., 2013).

A matriz de dependências estendida ou associada constitui uma estrutura conceitual, necessária para construir os vetores e operadores matemáticos, onde as linhas da matriz de dependências original são incrementadas com novas linhas correspondentes aos CBNs. Passando os CBNs a agir como novos CANs, e fazendo-os depender de si mesmos, para evitar a perda de funcionalidade da matriz. Na *Tabela 5* é apresentada a matriz de dependências estendida formada a partir da matriz de dependências já ordenada, mostrada na *Tabela 4*. O vetor de estados de disponibilidade em função do tempo, é formado por  $n$  elementos, sendo  $n$  o total de componentes da matriz de dependências, organizados de forma que os CBN são posicionados a continuação dos CAN, de acordo à ordem de aparição na matriz de dependências. O vetor tem a mesma composição que a coluna dos equipamentos da matriz de dependências estendida apresentada na *Tabela 5*. O vetor de estados no tempo define-se como:  $V = \{ V_i(t), i = 1, 2, \dots, n \}$ , sendo que  $V_i(t) \in [0, 1]$ , segundo a disponibilidade do componente  $i$ .

O operador matricial de dependências em série:  $S = \{ S_{i,j}, i, j = 1, 2, \dots, n \}$ , define uma matriz quadrada de ordem  $n$ , na qual cada linha vai representar um elemento do vetor de estados, e armazenará valores binários, de forma que  $S_{i,j} = 1$  quando um componente  $j$  forma parte das dependências seriais da linha  $i$  na matriz de dependências estendida; caso contrário o elemento tem valor nulo,  $S_{i,j} = 0$ . A *Figura 17* mostra o operador serial formado a partir da

matriz de dependências estendida apresentada na *Tabela 5*. Onde percorrendo a primeira linha, é possível reconhecer quatro elementos da primeira linha da matriz de dependências estendida nas posições, 2 até 5, exatamente como eles aparecem posicionados na coluna dos equipamentos.

Tabela 5 – Matriz de dependências estendida para a aplicação do MPM

Nível	Nr	Equipamento	Dependências			
			@RES1	@NODO	@RES2	@TR
1	1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	3	@RES1	@NIV1	@NIV2		
2	4	@RES2	@NIV3	@NIV4		
2	5	@TR	@VOLG			
3	6	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	7	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	8	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	9	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	10	@TUR-GEN1	@FLU1	@VOL1		
4	11	@TUR-GEN2	@FLU2	@VOL2		
4	12	@TUR-GEN3	@FLU3	@VOL3		
4	13	@TUR-GEN4	@FLU4	@VOL4		
4	14	@VAL1	@AIR1	FS:@VIC1		
4	15	@VAL2	@AIR2	FS:@VIC2		
4	16	@VAL3	@AIR3	FS:@VIC3		
4	17	@VAL4	@AIR4	FS:@VIC4		
5	18	@AIR1	AIR1			
5	19	@AIR2	AIR2			
5	20	@AIR3	AIR3			
5	21	@AIR4	AIR4			
5	22	@FLU1	FLU1			
5	23	@FLU2	FLU2			
5	24	@FLU3	FLU3			
5	25	@FLU4	FLU4			
5	26	@NIV1	NIV1			
5	27	@NIV2	NIV2			
5	28	@NIV3	NIV3			
5	29	@NIV4	NIV4			
5	30	@VIC1	VIC1			
5	31	@VIC2	VIC2			
5	32	@VIC3	VIC3			
5	33	@VIC4	VIC4			
5	34	@VOLG	VOLG			
5	35	@VOL1	VOL1			
5	36	@VOL2	VOL2			
5	37	@VOL3	VOL3			
5	38	@VOL4	VOL4			

O operador matricial de dependências em paralelo:  $P = \{ P_{i,j}, i, j = 1, 2, \dots, n \}$ , apresenta características similares ao operador serial. A estrutura define também uma matriz quadrada de ordem  $n$ , onde o valor de cada componente em paralelo é definido mediante:  $P_{i,j} = \frac{1}{r}$ , sendo  $r$  o número de elementos paralelos na linha da matriz de dependências estendida. Caso contrário o valor do elemento é nulo  $P_{i,j} = 0$ . A *Figura 18* mostra o operador de dependências em paralelo formado a partir da matriz de dependências estendida, apresenta na *Tabela 5*.

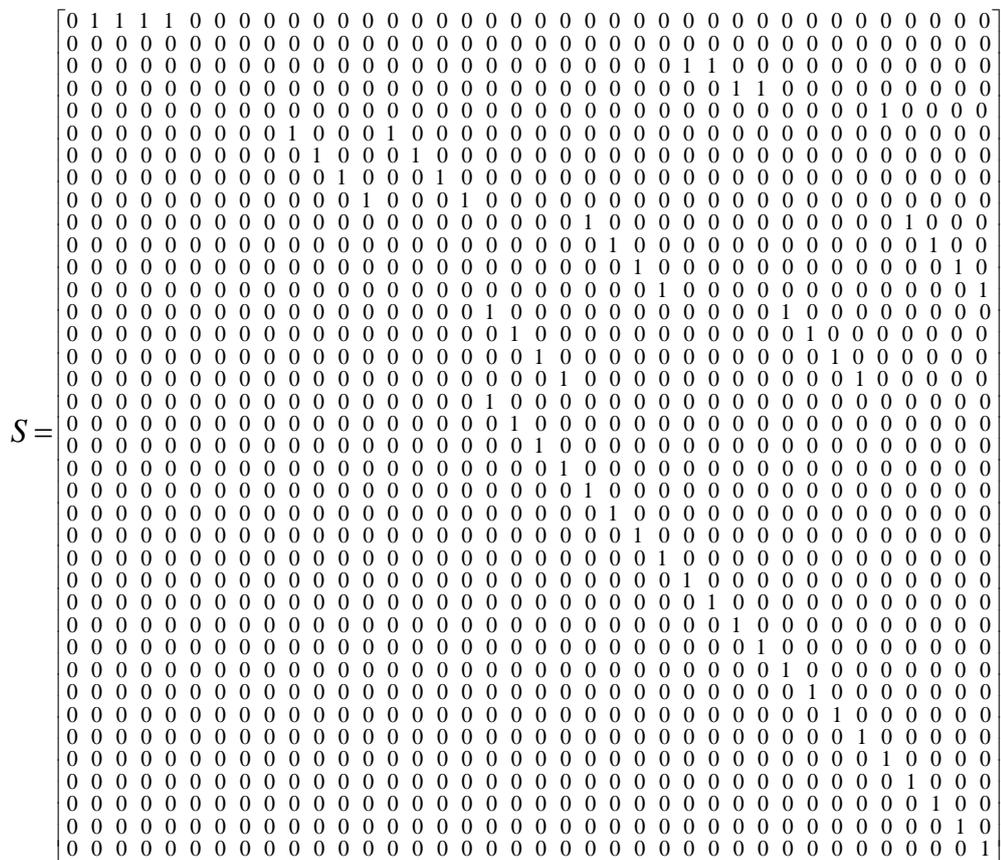


Figura 17 – Operador de dependências em série, onde são representados os elementos em série da matriz de dependências do sistema.

O operador paralelo carrega as informações dos elementos redundantes da matriz de dependências estendida. Analisando a segunda linha do operador é possível encontrar nas posições, 6 até 9, os elementos redundantes da segunda linha da matriz de dependências estendida nas posições indicadas pelo coluna de equipamentos. Como na matriz de dependências estendida temos 4 redundâncias na segunda linha e o critério de sucesso é 1/4,



disponibilidade, define o mecanismo utilizado pelo método para o cálculo da disponibilidade do sistema. Com esta finalidade, definimos o estado inicial do sistema  $R^{(k)}$  sendo  $k = 0$ , como:

$$R_i^0 = V_i \quad (25)$$

em seguida, o estado após propagar as dependências em série  $R^{k+1}$ , define-se na eq.(26):

$$R_i^{k+1}(t) = \min_{S_{i,j} > 0} (R_i^k(t) S_{i,j}), \forall i, j \in [1, n] \quad (26)$$

A aplicação do operador serial, eq. (26), envolve um produto escalar não convencional, onde o valor final do elemento  $i$  é calculado como o menor dos elementos após o produto vetorial entre o vetor de estados e a linha correspondente do operador  $S$ .

O estado do sistema armazenado no vetor de disponibilidade após propagar as dependências em paralelo  $R^{k+2}$ , encontra-se, efetuando a somatória dos resultados produto entre o vetor de estados e o operador de dependências em paralelo, para valores maiores que zero desta estrutura, o cálculo expressa-se como:

$$R_i^{k+2}(t) = \sum_{P_{i,j} > 0} P_{i,j} R_i^{k+1}(t), \forall i, j \in [1, n] \quad (27)$$

Após uma propagação de estados precisamos aplicar parâmetros de normalização a fim de verificar as condições de disponibilidades externas impostas sobre o sistema, a normalização atua na forma de restrições evitando que apareçam valores espúrios de disponibilidade. Estas condições aparecem na seguinte forma:

$$c = \begin{cases} 0 & \rightarrow R_i^{k+2}(t) < D_i \\ 1 & \rightarrow R_i^{k+2}(t) \geq D_i \end{cases}$$

onde a variável  $c$  define um valor usado para normalizar o cálculo de disponibilidade em cada subsistema, e  $D_i$  vai ser o critério de disponibilidade de cada subsistema. A normalização é aplicada usando a expressão:

$$R_i^{k+3}(t) = c R_i^{k+2}(t) \quad (28)$$

As condições de normalização garantem que a propagação leve os valores de disponibilidade compatíveis com a disposição do sistema. Em seguida, avalia-se o critério de convergência na forma:

$$R_i^k(t) - R_i^{k+3}(t) \leq \varepsilon \rightarrow 0 \quad \forall i \in [1, n], \quad (29)$$

onde  $\varepsilon$  representa a tolerância ou erro de convergência. O processo de propagação  $R_i^{k+1}$ ,  $R_i^{k+2}$ ,  $R_i^{k+3}$  é repetido até que o critério de convergência *eq.(29)* seja satisfeito.

Uma vez que o critério de convergência *eq.(29)* é alcançado, o vetor de estados  $R_i^{k+3}$  vai conter a disponibilidade de cada subsistema separadamente, incluindo o valor correspondente ao sistema completo.

As operações básicas que definem o algoritmo que implementa o MPM, encontram-se representadas no diagrama de fluxo apresentado na *Figura 19*.

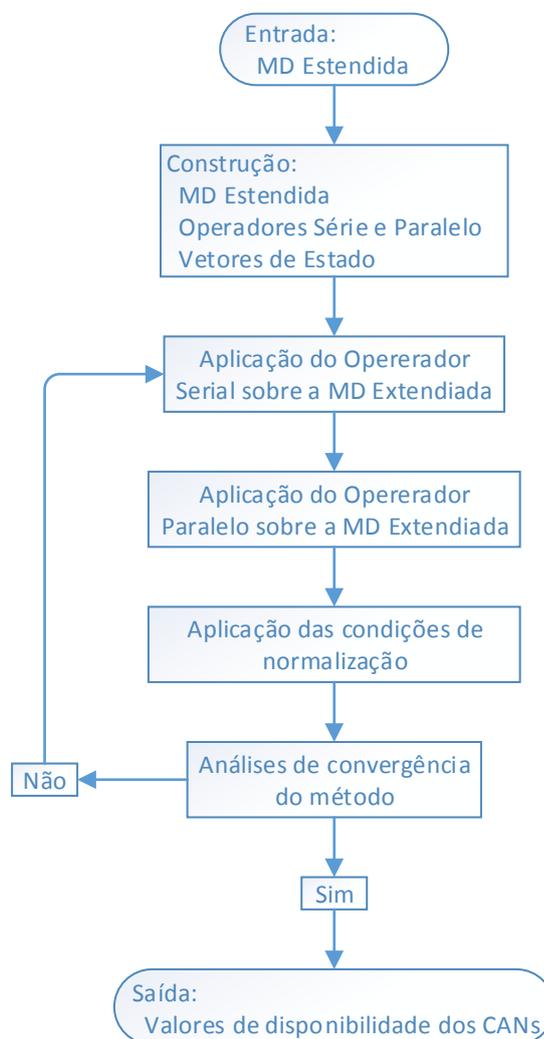


Figura 19 – Diagrama de fluxo do algoritmo da aplicação do MPM.

Uma vez alcançado um estado estável e conhecido o valor de disponibilidade do sistema, o algoritmo de propagação Markoviana vai ser executado novamente quando exista alguma mudança na disponibilidade dos elementos de entrada ou CBNs. No momento do

cálculo da disponibilidade geral do sistema são atualizados também os valores de disponibilidade pertencentes a cada subsistema.

Ressaltamos que o método descrito nesta seção não é rigorosamente um método Markoviano conforme descrito na seção 2.5.1. O MPM é um método inédito, sendo um dos principais aportes deste trabalho, ele é inspirado nos métodos de propagação Markovianos. Entretanto, conforme foi comentado, no MPM os operadores de transição não envolvem valores estocásticos e sim relações de dependências entre componentes. Ademais, o vetor de estados não armazena a disponibilidade do sistema em função do tempo, e sim a disponibilidade de todos os componentes do sistema no instante  $t$ . Também, no MPM o tempo é uma grandeza genérica associada ao processo iterativo de propagação não representando o tempo horário ou convencional.

### 4.3 Análises de desempenho do MPM

Na *Seção 3.4* foi analisado o desempenho dos algoritmos associados ao MMD. Seguindo esse mesmo procedimento, nesta seção são apresentados os parâmetros: consumo de memória e tempo de execução para o MPM. Dentro do modelo de cálculo utilizado o Consumo de Memória (CM), pode ser definido como a quantidade de elementos armazenados, contidos nas estruturas de dados utilizadas, sendo definido pela expressão

$$CM_{MPM} = 2n(n+1) \quad (30)$$

onde  $n$  é o número de componentes da matriz de dependências estendida correspondente ao sistema avaliado. Destacamos que o consumo de memória do método é elevado, principalmente se consideramos que as matrizes dos operadores  $S$  e  $P$  são esparsas. Neste sentido, o uso de técnicas de representação de matrizes esparsas é recomendado, e deve diminuir significativamente o consumo de memória.

O Tempo de Execução (TE) é definido pelo número de operações primitivas, supondo uma duração constante para cada instrução executada. Dessa forma para o sistema analisado temos que:

$$TE_{MPM} = n^2 I \Rightarrow O(n^2) \quad (31)$$

onde  $I$  representa o número de iterações necessárias para alcançar o estado de convergência. O algoritmo vai ter complexidade quadrática devido a que o numero de iterações esta associado com o número de níveis da arvore hierárquica que representa o sistema, sendo  $n \gg I$ .

#### 4.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram introduzidos os principais elementos que definem o Método de Propagação de Markov para a avaliação de disponibilidade em sistemas destinados à geração hidrelétrica. A metodologia não constitui uma abordagem de Markov, produto que não são empregados distribuições de probabilidade do sistema e as matrizes de transição não envolvem valores estocásticos. No entanto, no método temos um processo de propagação de estados e o uso de operadores de transição, pelo que foi decidido adotar o nome de propagação Markoviana para este método.

O método (MPM) proporciona um modelo quantitativo de análises, obtendo-se como resultados a caracterização de disponibilidade do sistema no intervalo  $[0, 1]$ , de forma que o valor 0 indica a indisponibilidade do sistema e 1 disponibilidade total do mesmo.

As etapas para aplicação do MPM são:

- construir a matriz de dependências estendida;
- construir os operadores em série e paralelo;
- aplicar o processo iterativo de propagação Markoviana;
- oferecer os resultados de disponibilidade do sistema.

Ademais foi mostrado que o desempenho do método é caracterizado por complexidade quadrática no consumo de memória e no tempo de processamento.

## **5 IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS**

Numa sequência lógica de desenvolvimento, temos apresentado os sistemas de geração de energia hidrelétrica, a importância das análises de disponibilidade nestes sistemas, e as metodologias construídas para esse fim neste trabalho. O presente capítulo faz referência à implementação das metodologias de avaliação de disponibilidade em códigos computacionais; fazendo possível a integração dos elementos abordados nos capítulos iniciais, mediante a simulação e análises de dois estudos de caso, organizados a partir da projeção de possíveis falhas nas usinas hidrelétricas avaliadas.

Inicialmente, serão abordados os elementos convencionais de programação que foram empregados para desenvolver e aplicar as metodologias criadas. Em seguida analisamos as usinas consideradas como estudos de caso, e os resultados das diferentes avaliações de disponibilidade feitas mediante as simulações do comportamento do sistema perante eventuais cenários de falhas. Nestas simulações foram utilizados os códigos computacionais desenvolvidos.

### **5.1 Implementação**

Para fazer possível a avaliação das metodologias de análises de disponibilidade abordadas nos capítulos anteriores, foi desenvolvido um código computacional na linguagem de programação Java<sup>3</sup>. Este código utiliza como entrada os arquivos dos sistemas com as matrizes de dependências e os vetores de estados; e calcula o estado de disponibilidade, em valores qualitativos ou quantitativos, para cada sistema geral e para o conjunto de subsistemas

---

<sup>3</sup> Linguagem de programação orientada a objeto desenvolvida na década dos 90, na atualidade pertencente à corporação Oracle. A linguagem encontra-se disponíveis em plataformas como Eclipse e NetBeans.

derivados dele. As classes desenvolvidas para implementar os métodos MMD e MPM encontram-se disponíveis na plataforma Git<sup>4</sup>, permitindo ser acessadas no seguinte enlace: <https://github.com/gustavitin/Disponibilidade.git>.

A escolha da linguagem de programação Java, esta justificada em vários motivos, principalmente pela existência de trabalhos de pesquisa prévios que já utilizavam essa linguagem (FORNARI, 2013). Ademais, a linguagem é amplamente difundida e utilizada pela qualidade e robustez do padrão de programação, e tem amplas bibliotecas para as análises de cadeias de caracteres, as quais foram extensivamente exploradas no desenvolvimento dos códigos computacionais (DEITEL, 2004).

O ambiente de desenvolvimento (IDE, Integrated Development Environment) utilizada no projeto foi o Eclipse Juno, pertencente a plataforma aberta de desenvolvimento Eclipse<sup>5</sup>.

#### 5.1.1 Estruturas de dados

Os componentes, subsistemas e sistemas das usinas, representados mediante cadeias de caracteres, foram modelados utilizando matrizes de dependências. Para armazenar estas estruturas, consideraram-se duas características: a primeira relacionada à estrutura irregular das matrizes, sendo que a diferença no número de elementos em cada linha poderia causar alocações de memória espúrias para elementos nulos em estruturas de armazenamento definidas estaticamente. A segunda característica esteve relacionada com alocação dinâmica de memória, visando inserir de forma eficiente novos elementos em qualquer lugar da estrutura sempre que fosse necessário.

Tendo em contas as características anteriores, e as particularidades da linguagem de programação Java, as estruturas escolhidas para o armazenamento dos componentes das usinas e a representação das MD foram às listas encadeadas. O gráfico da *Figura 20* exibe uma representação geral de uma lista encadeada genérica. Particularmente, nas listas encadeadas utilizadas, os elementos foram duplamente enlaçados, da mesma forma que é representado na *Figura 20b*, o que é necessário para implementar os percursos *Top – Down* e *Bottom – Up* presentes nos algoritmos de varredura do MMD, possibilitando percorrer o arranjo de elementos da matriz em ambas direções.

---

<sup>4</sup> Sistema de revisão e controle distribuído para desenvolvimento de códigos computacionais.

<sup>5</sup> Ambiente de desenvolvimento integrado, utilizada para criar aplicações em diversas linguagens de programação.

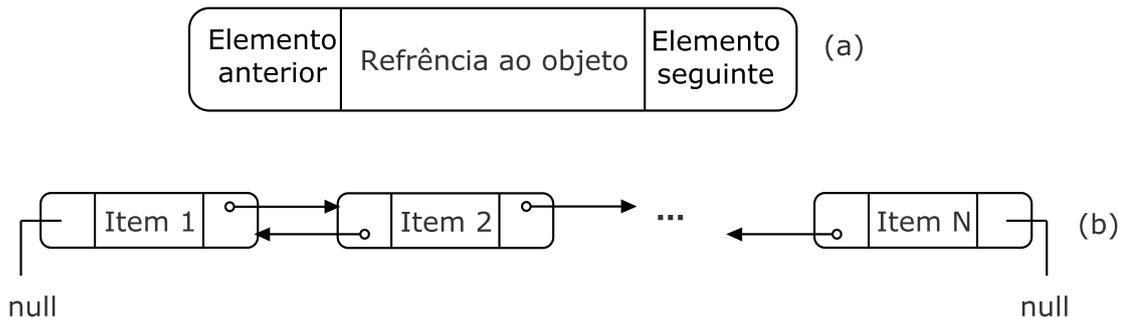


Figura 20 – Representação gráfica de uma lista duplamente encadeada, (a) estrutura de um elemento, (b) lista de elementos.

Para implementar a matriz de dependências teve que ser utilizada uma lista de listas, isto é, cada elemento da lista, é uma lista com as suas dependências, ver

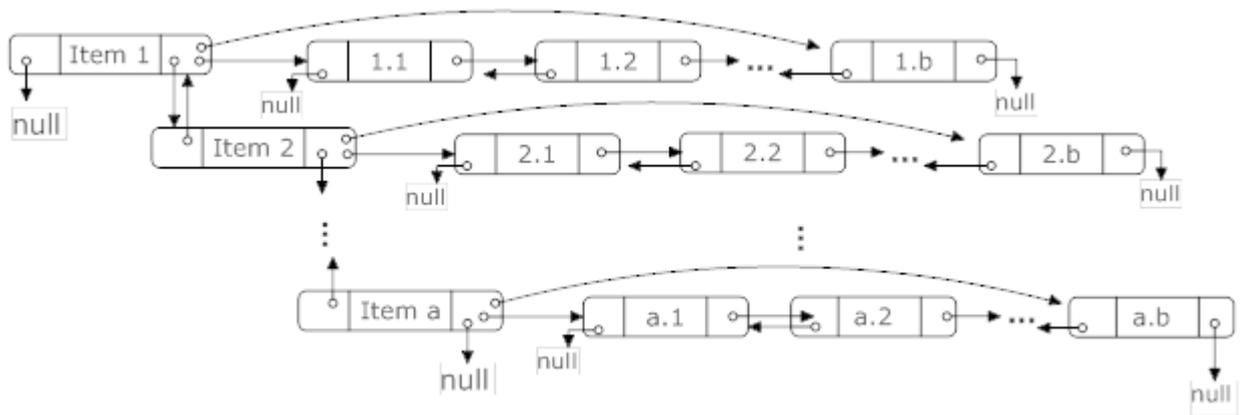


Figura 21. Nesta estrutura os elementos da lista principal são duplamente encadeados, ao tempo que cada um deles tem ponteiros direcionados ao primeiro e último elemento de outra lista, desse modo formam-se as  $a$  linhas e  $b$  colunas da matriz.

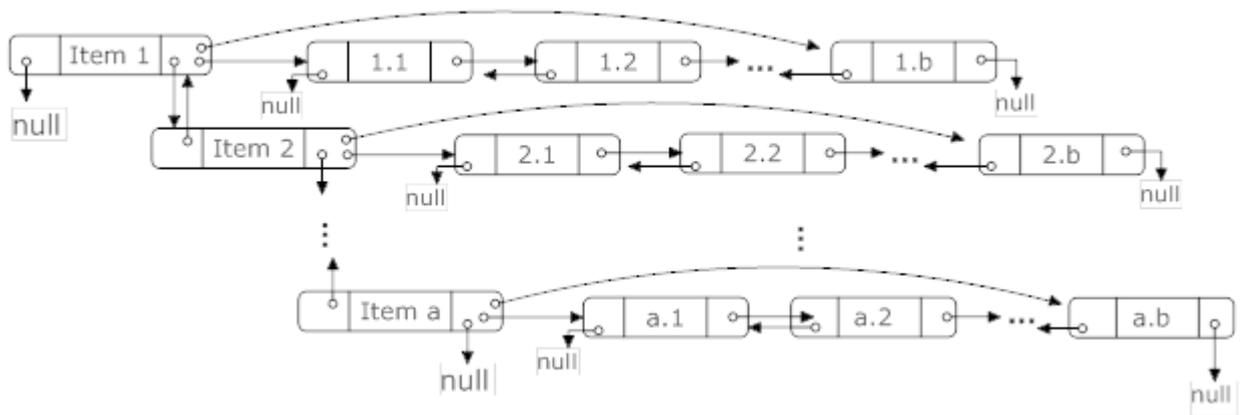


Figura 21 – Matriz de dependências representada usando uma lista de listas com elementos duplamente encadeados.

Outra importante estrutura de dados empregada no desenvolvimento dos códigos computacionais foram as pilhas, as quais por sua vez utilizaram encadeamento dos elementos para formar os conjuntos de dados. Estas estruturas formam a base para o desenvolvimento do algoritmo de ordenação *QuickSort* na sua versão iterativa. A *Figura 22* mostra a representação de uma pilha, especificamente do tipo LIFO (*Last In First Out*), onde (a) mostra a inserção e extração de elementos e (b) a forma como foram enlaçados os elementos armazenados dentro da pilha, que intencionalmente tem a mesma estrutura das listas apresentadas anteriormente na *Figura 20*.

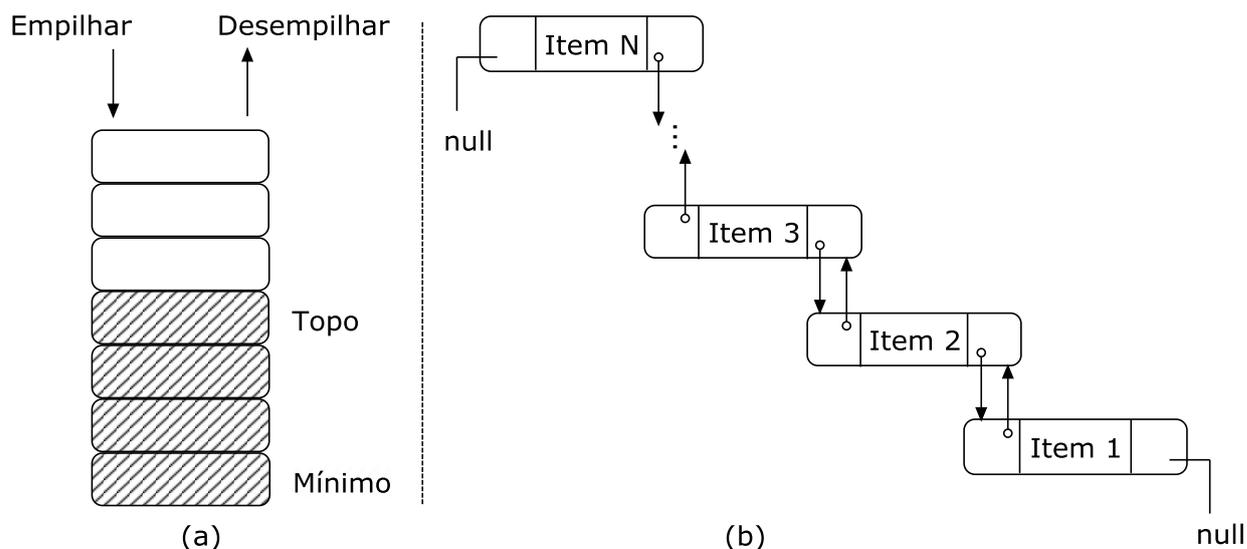


Figura 22 – Estrutura de pilha, (a) processo de armazenar e retirar elementos da estrutura de pilha, (b) construção da estrutura da pilha mediante encadeamento duplo dos elementos.

De forma geral, a manipulação dos elementos da pilha só precisa de um ponteiro, nesse caso para referenciar o elemento seguinte dentro da estrutura. O uso de dois ponteiros com encadeamento duplo apresentado na *Figura 22b*, é uma consequência da reutilização das estruturas de classes já criadas para o armazenamento de elementos da matriz de dependências.

### 5.1.2 Estrutura de classes

Nesta seção são mostrados por separado os diagramas de classes das metodologias MMD e MPM, utilizando para esse fim a linguagem de representação UML<sup>6</sup> (*Unified Modeling Language*). Esta linguagem é amplamente conhecida e utilizada como padrão para a elaboração de estruturas de projetos em diversas áreas da ciência incluindo a produção de software.

Os diagramas de classes são representações gráficas, compostos basicamente de classes utilizadas dentro de um código computacional e as relações estabelecidas entre elas. Pode-se afirmar que diagramas de classes são capazes de modelar características estáticas de um sistema, dado que podem ser utilizados em qualquer momento dentro do tempo de vida de um projeto (RUMBAUGH et al., 1999).

<sup>6</sup> Projeto de modelagem de estruturas criado pelo Object Management Group (OMG), outras informações disponível em: <http://www.uml.org>.

Uma classe pode ser definida como a descrição de um conjunto de objetos que compartilham os mesmos atributos, operações, relacionamentos e semântica (BOOCH et al., 1998). A representação da classe é dada em forma de um retângulo subdividida em três espaços, sendo a primeira divisão responsável pelo nome e as segunda e terceira correspondem aos atributos e métodos respectivamente. Além de possuir características próprias, as classes também são capazes de interagir entre si de acordo ao tipo de relacionamento que elas tenham dentro da estrutura do programa.

O diagrama de classes correspondente ao método MMD encontra-se representado na *Figura 23*. O diagrama apresenta quatro classes, uma correspondente ao programa principal nomeada DMM, desde a qual são invocadas o resto das funcionalidades e métodos, as outras três correspondem à implementação das estruturas de dados e as operações associadas as análises de disponibilidade, sendo classificadas da seguinte forma:

- *DNode*, simula um elemento do sistema, já seja um CAN (sistema ou subsistema) ou CBN (equipamento), o qual constitui o elemento básico na construção das estruturas de dados. A classe tem dois ponteiros para referenciar os elementos anterior e seguinte na lista encadeada.
- *DList*, recreia um vetor formado a partir do enlace dos dispositivos e da mesma forma utiliza dois ponteiros para direcionar os vetores anterior e seguinte. Adicionalmente esta classe tem um conjunto de atributos utilizados na ordenação da matriz de dependências, e na propagação de estados de disponibilidade.
- *DMatrix*, implementa uma lista de vetores encadeados, seguindo a mesma lógica já utilizada na classe anterior. Nesta classe foram desenvolvidas a maior parte das operações do código, sendo que nela estão alocadas as principais funções, tais como ordenação, leitura de arquivos e os algoritmos de varredura.

A *Figura 24* mostra o diagrama de classes utilizadas na implementação do MPM, sendo que, produto do uso da MD como estrutura de dados principal, o desenvolvimento do código baseou-se numa estrutura de classes similar à apresentada para o método MMD (*Figura 23*).

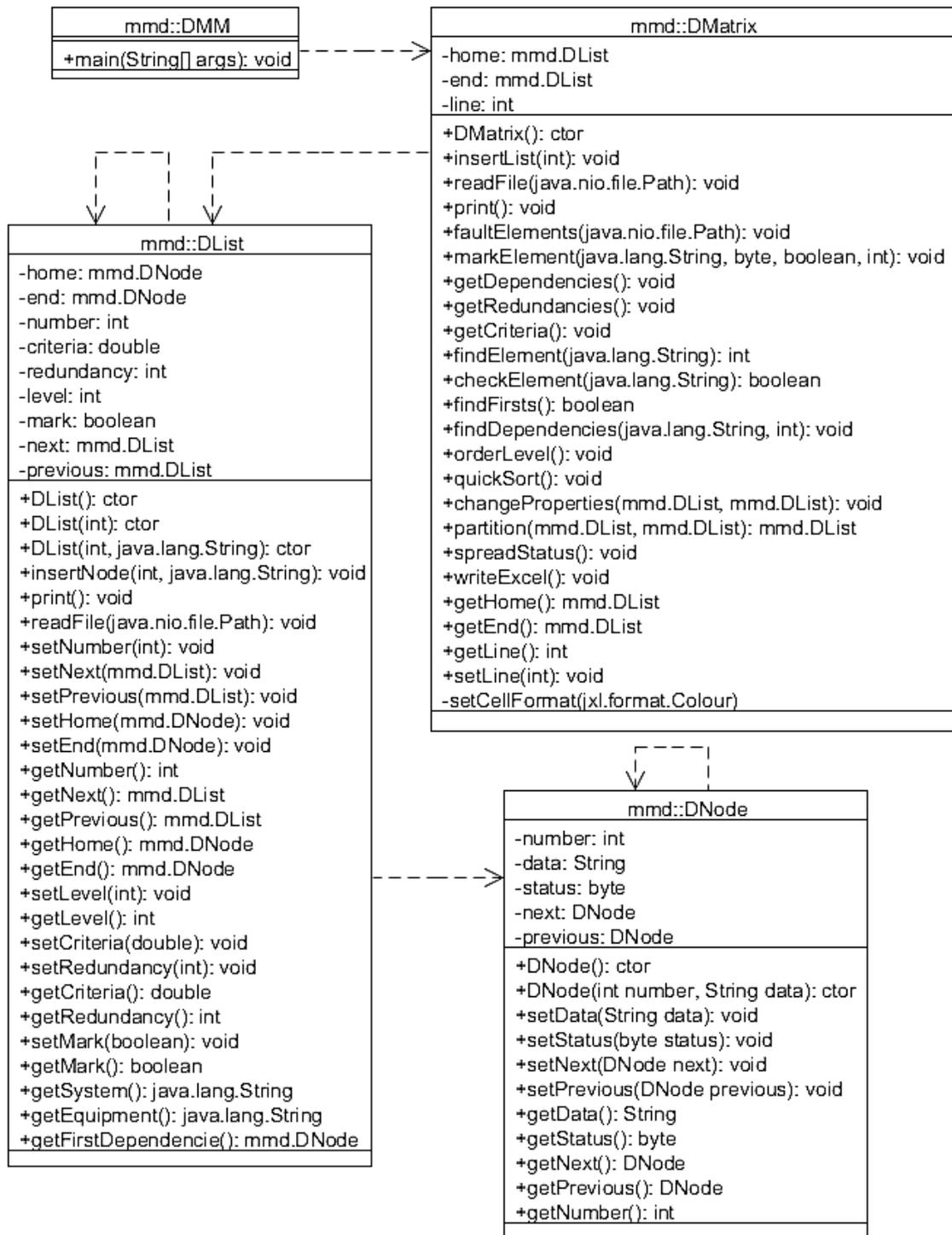


Figura 23 – Estrutura de classes do MMD.

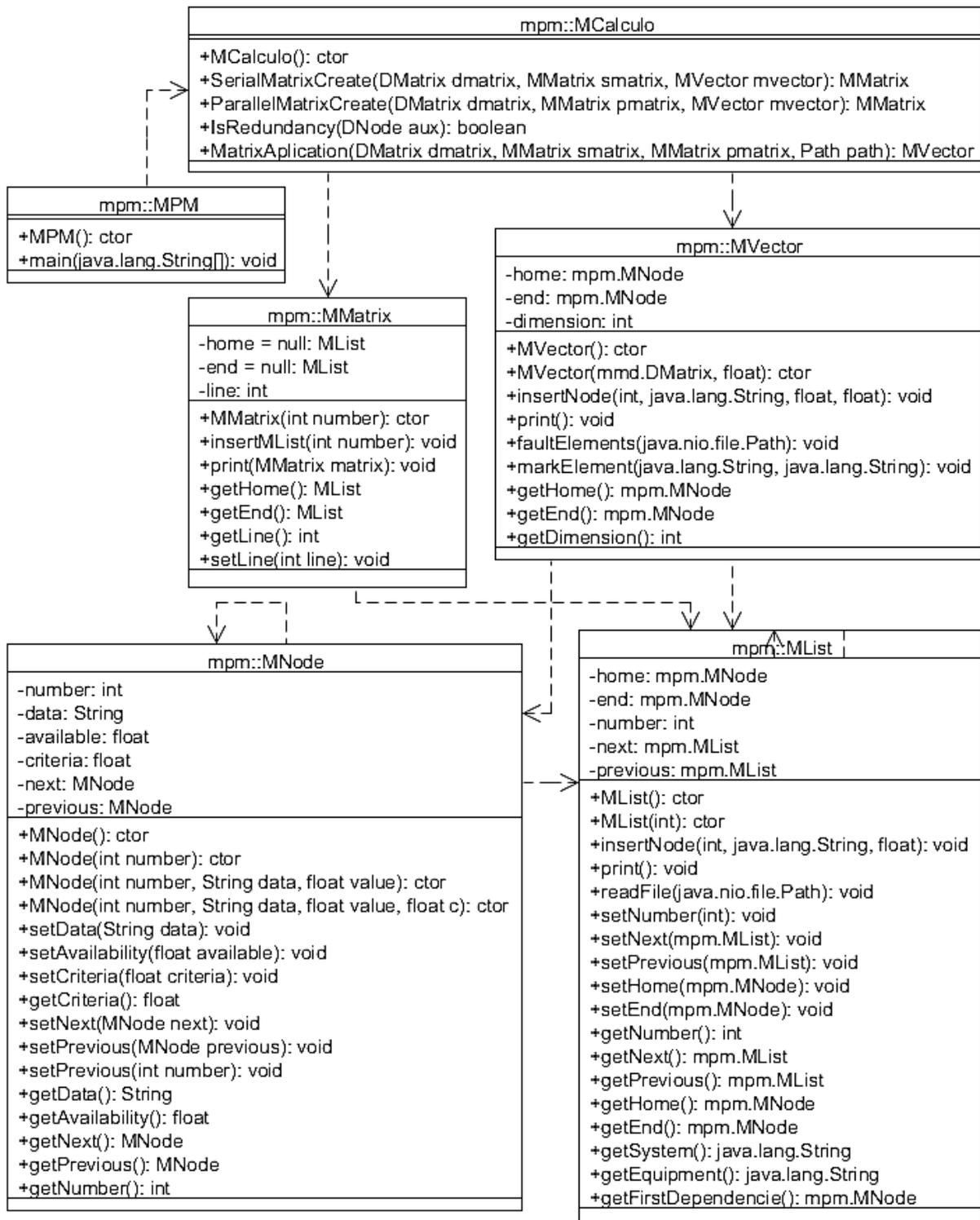


Figura 24 – Estrutura de classes do MPM.

A classe correspondente ao método principal MPM, junto com as outras classes, correspondentes às estruturas de dados *MNode*, *MList* e *MMatrix*, apresentam tipos de dados e funções em comum com os desenvolvidos no método MMD, embora existam algumas diferenças, tais como o número de variáveis, que justificam o uso de uma nova classe. Ao

mesmo tempo, dado o número reduzido de estruturas do mesmo tipo, não é necessário o uso de herança. Adicionalmente foram utilizadas duas classes:

- *MVector*, recreia um vetor que armazena o total de dispositivos do sistema, formado a partir do enlace desses dispositivos. Esta estrutura possibilita a implementação dos operadores matemáticos, os quais poderiam ter sido implementados utilizando arranjos de dados fixos, embora preferiu-se reutilizar as estruturas e códigos já desenvolvidos.
- *MCalculo*, representa a classe na qual foram definidos a maior parte das funções de cálculo associados aos operadores Markovianos e ao processo iterativo do método MPM.

Nos códigos existe um enlace interno entre ambas as implementações, não visível dentro dos diagramas de classes apresentados mas interessante do ponto de vista computacional. Neste sentido, devido a que a aplicação dos métodos é realizada de forma simultânea produto à complementação deles, o código que implementa o MMD lê e ordena a matriz de dependências, e o MPM importa esses dados para realizar os cálculos correspondentes ao método, evitando repetir o processo de ordenação novamente.

A construção dos diagramas de classes foi realizada através da importação automática, utilizando engenharia reversa dos códigos desenvolvidos. Para esse fim foi utilizado um *plugin* instalado no Eclipse Juno nomeado UMLet<sup>7</sup>.

## 5.2 Estudo de Caso I

Uma vez concluídos os códigos computacionais que implementam as metodologias de avaliação de disponibilidade desenvolvidas no presente trabalho, o próximo passo no avanço da pesquisa é avaliar as metodologias projetadas, supondo que a implementação está livre de erros, que possam trazer resultados incorretos.

Neste passo inicial, como primeiro estudo de caso, vamos retomar a usina hidrelétrica simplificada que temos utilizado no decorrer dos capítulos anteriores para exemplificar as metodologias e conceitos que têm sido apresentados. Neste ponto vamos fazer uma análise mais aprofundada dos componentes da usina.

Como já foi analisado anteriormente, a representação simplificada da usina hidrelétrica apresentada novamente na *Figura 25*, tem apenas os componentes principais de uma

---

<sup>7</sup> UMLet, ferramenta de código aberto, destinada a criar diagramas UML de forma simples e rápida. Projeto disponível em: <http://www.umlet.com>.

instalação para geração de eletricidade utilizando a energia potencial associada a uma queda de água.

Conforme apresentado no desenho, a UHE possui quatro unidades geradoras idênticas redundantes entre elas, localizadas em um elemento (NODO). As unidades estão ligadas aos reservatórios de água (RES1) a montante e (RES2) a jusante, dependentes dos níveis de água (NIV1), (NIV2) e (NIV3), (NIV4) respectivamente. O critério de falha para esses subsistemas estabelece que, caso o nível de água do reservatório a montante esteja muito baixo ou no de jusante muito alto, não será possível gerar energia. Por outro lado, se o nível de água a montante estiver acima da capacidade, poderá causar danos aos equipamentos da usina, e a vizinhança do reservatório.

Cada uma das quatro linhas de geração possui uma comporta (VAL) que é operada por um sistema hidráulico com um mecanismo de falha segura. O sistema hidráulico é acionado através de um sistema pneumático com pressão de ar (AIR) e conta com um mecanismo responsável pela abertura e fechamento da comporta (VIC). Esse mecanismo possui um sistema de falha segura, ou seja, caso o mecanismo esteja danificado, um sistema passivo baseado na gravidade fechará a comporta provocando a parada da unidade.

Além da comporta, as unidades possuem um sistema turbo-gerador (TUR-GEN), responsável pela geração de eletricidade, formado pela turbina hidráulica (TUR) e o gerador elétrico (GER). Neste sistema, os parâmetros controlados são o fluxo de água (FLU) e a tensão na saída do gerador (VOL).

Na saída das unidades geradoras, encontra-se uma subestação de transmissão de energia (TR), que possui apenas uma dependência direta, denominada verificador de tensão (VOLG).

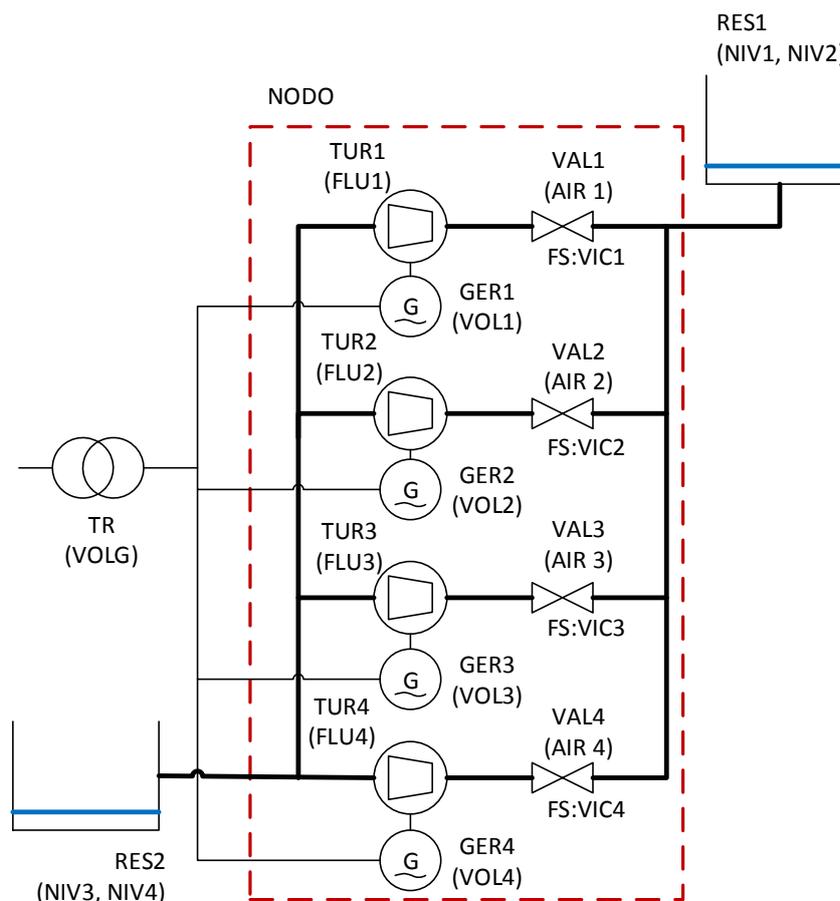


Figura 25 – Representação simplificada de uma usina hidrelétrica genérica

Com o objetivo de aplicar os modelos de cálculo de disponibilidade descritos neste trabalho, considera-se que sob condições normais de trabalho duas linhas de geração conseguem prover o 100% da demanda de energia planejada, sem afetar o correto funcionamento da planta.

O modelo simplificado de UHE genérica apresentado na *Figura 25* está composto por 17 CANs e 21 CBNs, sendo um total de 38 componentes, a MD correspondente aparece na *Tabela 7*.

Seguidamente são descritos os cenários de testes, que descrevem a falha de alguns dos componentes do estudo de caso analisado, mediante os quais, será avaliado o funcionamento das metodologias MMD e MPM:

- Cenário I: Este cenário tem um CBN indisponível (FLU1), associado ao fluxo de água da turbina (TUR1) na primeira linha de geração.

- Cenário II: Adicionamos ao elemento do Cenário I outro CBN indisponível (AIR3), correspondente à pressão de ar no sistema pneumático na terceira linha de geração, afetando a válvula (VAL3).
- Cenário III: Neste cenário são considerados indisponíveis os elementos dos cenários I e II (FLU1, AIR3), e o controle de voltagem (VOL4) no gerador (GEN4) na quarta linha de geração.
- Cenário IV: Esta prova inclui quatro elementos indisponíveis (FLU1, AIR3, VOL4), e a pressão de ar (AIR2) no sistema pneumático da válvula (VAL2) na segunda linha de geração.
- Cenário V: O teste tem sinalizado o nível de água baixo (NIV1) pertencente ao reservatório a montante.
- Cenário VI: Neste caso estão sinalizados os níveis de água (NIV1 e NIV3) correspondentes aos reservatórios a montante e jusante respectivamente.
- Cenário VII: Este cenário tem como elementos indisponíveis (AIR2 e VIC2), correspondentes à pressão de ar e ao mecanismo de controle da válvula (VAL2).

Uma descrição detalhada do caso de estudo e dos cenários de teste é oferecida no Anexo A.

### 5.2.1 Resultados do MMD

Os cenários de teste projetados para estudar o comportamento da disponibilidade no primeiro caso de estudo estão resumidas na *Tabela 6*. Conforme mostrado na coluna Componentes Indisponíveis, os cenários propostos estão caracterizados pelo uso de um ou vários elementos falhados, que serão processados pelo sistema utilizando o vetor de estados em cada situação por separado. Como já foi analisado no *Capítulo 3*, o vetor de estados vai conter os códigos dos elementos indisponíveis, os quais vão ser representados na matriz de dependências utilizando a escala qualitativa de disponibilidade proposta. A matriz de dependências do sistema já ordenada pode ser consultada na *Tabela 4* do *Capítulo 3*.

A *Tabela 6* também mostra os resultados de disponibilidade final da planta avaliada para os diferentes cenários propostos usando o MMD. Os estados de disponibilidade são apresentados na matriz de dependências correspondente ao sistema de acordo à escala qualitativa de cores da *Figura 14*.

Tabela 6 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MMD correspondentes ao Estudo de Caso I.

Cenário	Componentes Indisponíveis	Disponibilidade Final do Sistema
I	FLU1	Degradado
II	FLU1, AIR3	Muito Degradado
III	FLU1, AIR3, VOL4	Indisponível
IV	FLU1, AIR3, VOL4, AIR2	Indisponível
V	NIV1	Muito Degradado
VI	NIV1, NIV3	Indisponível
VII	AIR2, VIC2	Degradado

Os resultados dos algoritmos de propagação dos elementos indisponíveis na matriz de dependências recolhidos nos sete testes podem ser consultados no Anexo A. A *Tabela 7* mostra a matriz de dependências resultante para o cenário I.

Tabela 7 – Matriz de dependências resultante para o cenário I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

Na *Tabela 7* pode ser observado não somente o estado final do sistema (SM), e sim o estado de todos os subsistemas da planta na coluna Equipamentos.

A *Figura 26* apresenta os resultados dos processos de varredura realizados dentro da matriz de dependências apresentada, correspondentes ao MMD. A primeira coluna, *Figura 26a*, corresponde aos equipamentos ou CANs da matriz de dependências após a varredura direta; a segunda coluna, *Figura 26b*, corresponde aos estados após a varredura indireta,

lembrando que com a finalização desta varredura conclui o processo de propagação de dependências. A *Figura 26a* tem o sistema turbo-gerador (TUR-GEN1) afetado pelo elemento fluxo de água (FLU1). Sucessivamente vão ser afetados a turbina (TUR1) o elemento (NODO) e o sistema (SM). Os processos de varredura correspondentes aos restantes cenários, também podem ser consultados no Anexo A.

@SM	@SM
@NODO	@NODO
@RES1	@RES1
@RES2	@RES2
@TR	@TR
@LINHA1	@LINHA1
@LINHA2	@LINHA2
@LINHA3	@LINHA3
@LINHA4	@LINHA4
@TUR-GEN1	@TUR-GEN1
@TUR-GEN2	@TUR-GEN2
@TUR-GEN3	@TUR-GEN3
@TUR-GEN4	@TUR-GEN4
@VAL1	@VAL1
@VAL2	@VAL2
@VAL3	@VAL3
@VAL4	@VAL4

(a) (b)

Figura 26 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Em cada cenário de teste, foram analisados os critérios de falha através de uma inspeção visual, percorrendo manualmente a propagação de estados dos CANs da matriz de dependências a partir dos CBNs indisponíveis. Os resultados obtidos manualmente foram comparados aos obtidos pelo MMD a fim de verificar o correto funcionamento do método. Com essa finalidade também foram comparados os resultados obtidos pelo método MPM, apresentados na seguinte seção.

### 5.2.2 Resultados do MPM

Como já foi analisado no *Capítulo 4*, o método qualitativo de avaliação de disponibilidade MPM, reutiliza a estrutura de matriz de dependências para desenvolver os operadores e cálculos associados ao método. Dessa forma diminui o número de operações realizadas pela metodologia e incrementa a eficiência de outros parâmetros computacionais, tais como, tempo de processamento e consumo de memória.

O primeiro passo realizado pelo MPM consiste na construção a partir da matriz de dependências das quatro estruturas que posteriormente possibilitarão o cálculo de disponibilidade, elas são: a matriz de dependências estendida, os operadores matemáticos Markovianos (serial e paralelo), e o vetor de disponibilidade.

A matriz de dependência estendida, conforme descrito, é uma estrutura teórica recreada com o objetivo de construir os operadores matemáticos do método, ela adiciona à matriz de dependências original um número de linhas determinado pelo número de CBN do sistema, de forma que esses elementos vão se comportar como CANs que dependem apenas deles mesmos, assim será possível a construção de um operador com igual número de linhas à matriz de dependência estendida no qual cada linha vai ter a representação de todos os CANs, incluindo os recentemente “criados”. Dessa forma o operador de dependências em série vai ter finalizar com uma submatriz identidade, correspondente as linhas dos novos CANs que foram adicionados. A *Figura 17* apresenta o operador serial correspondente à matriz de dependências do Caso de Estudo I avaliado nesta seção.

Os resultados obtidos do cálculo de disponibilidade utilizando o MPM para os cenários propostos na seção anterior são apresentados na *Tabela 8*. Como pode ser apreciado cada um dos valores calculados de disponibilidade final do sistema coincide com as avaliações feitas pelo método MMD, já apresentadas na *Tabela 6*.

A análise anterior é realizada utilizando uma escala binária para a disponibilidade dos componentes básicos do sistema, ou seja, seu estado de disponibilidade vai ser 0 ou 1 sem existir valores intermediários. Mais, como já foi mencionado anteriormente, os sistemas hidrelétricos são caracterizados pela degradação constante de seus elementos. Então, existe a possibilidade de fazer uma análise do comportamento do sistema tomando como parâmetro a degradação progressiva dos elementos do sistema, dessa forma conseguiremos explorar exaustivamente a metodologia construída.

Tabela 8 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MPM, correspondentes ao Estudo de Caso I.

<b>Cenário</b>	<b>Componentes Indisponíveis</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema</b>
<b>I</b>	FLU1	0,75
<b>II</b>	FLU1, AIR3	0,50
<b>III</b>	FLU1, AIR3, VOL4	0,0
<b>IV</b>	FLU1, AIR3, VOL4, AIR2	0,0
<b>V</b>	NIV1	0,50
<b>VI</b>	NIV1, NIV3	0,0
<b>VII</b>	AIR2, VIC2	0,75

Esta análise pode ser feita em dois sentidos, se consideramos os valores de disponibilidade de entrada como dados isolados será possível conhecer a disponibilidade geral do sistema em um momento determinado. Visto desde outro ponto, a disponibilidade de entrada pode ser uma função no tempo da durabilidade de um componente, dessa forma o critério de disponibilidade calculado pode dar uma medida da disponibilidade futura da planta, ou seja, um valor aproximado da confiabilidade. Este tipo de análise pode ser interpretado como um estudo de sensibilidade que relaciona a disponibilidade da usina com a disponibilidade de um o mais componentes que se degradam no tempo, considerando que os restantes componentes permanecem completamente disponíveis.

Na *Figura 27* é mostrado o comportamento do sistema para o cenário de teste II. Neste caso foi selecionada a degradação dos componentes (FLU1 e AIR3) como uma função linear no tempo, a fim de simplificar as simulações. Notem que o estado do sistema (SM) ante a degradação dos componentes citados, vai ter um comportamento também linear.

De forma similar, o cenário de teste IV, mostrado na *Figura 28*, representa o comportamento do sistema (SM) ante a degradação progressiva dos CBNs: (FLU1, AIR3, VOL4 e AIR2), situação utilizada para os fins de nosso estudo de caso, mais relativamente improvável numa planta real, devido a que os padrões de degradação dos componentes num sistema são característicos a cada elemento. Neste caso pode ser detectado o instante de tempo no qual o sistema fica indisponível, e os valores de disponibilidade dos componentes de entrada no momento desta transição.

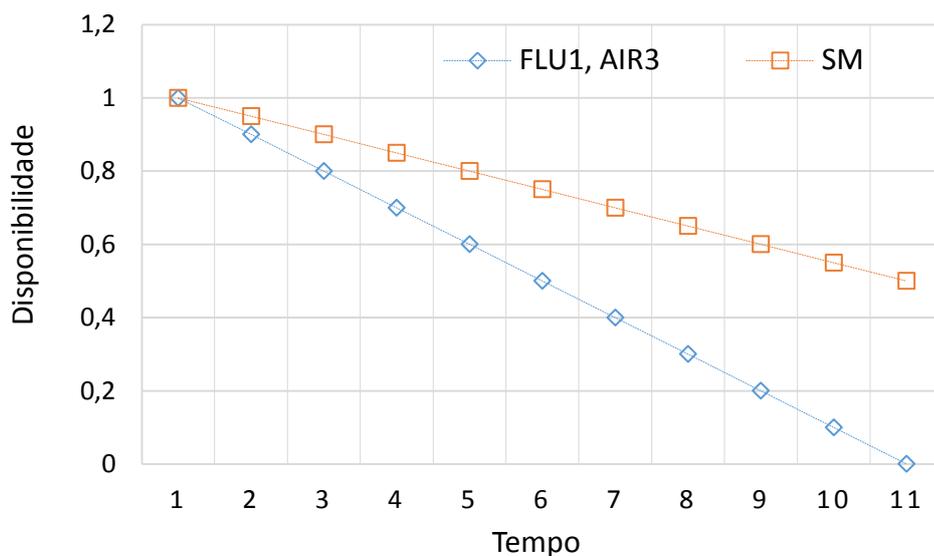


Figura 27 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no cenário II sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis, e utilizando uma escala de tempo genérica.

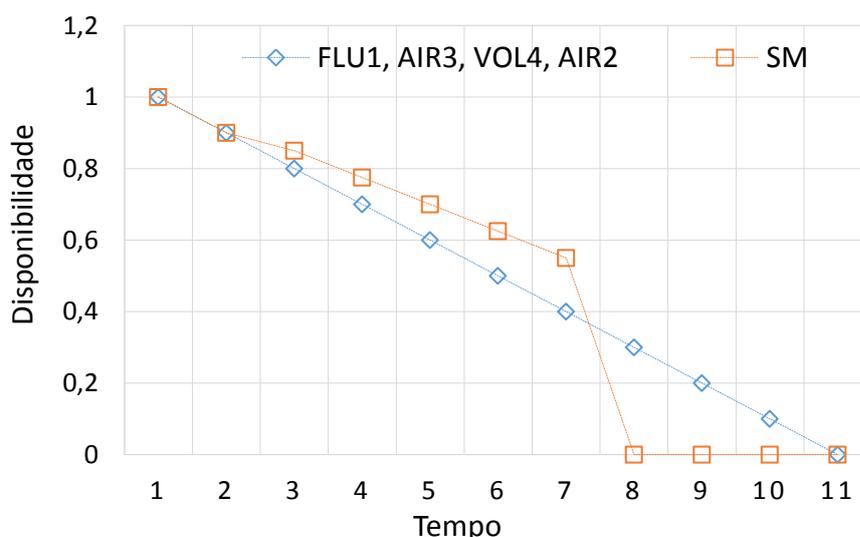


Figura 28 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no cenário IV sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis, e utilizando uma escala de tempo genérica.

É necessário ressaltar que esta queda abrupta de disponibilidade do sistema, no instante de tempo 8 da *Figura 28*, está relacionada às condições de disponibilidade impostas à planta segundo a redundância (2/4) das linhas de geração para produzir o total da energia planejada.

No Anexo A são mostradas as análises de sensibilidade para os restantes cenários, seguindo o mesmo padrão de degradação linear progressiva e equitativa em cada um dos componentes falhados, e utilizando uma escala de tempo genérica.

### 5.3 Estudo de Caso II

Com o objetivo de uma avaliação mais criteriosa das metodologias apresentadas nos capítulos anteriores, utilizou-se um segundo estudo de caso. Desta vez a planta empregada tem uma complexidade superior à apresentada no Estudo de Caso I, principalmente no número de componentes utilizados. Sendo esta, uma configuração obtida a partir da Usina de Água Vermelha operada pela AES Tietê.

#### 5.3.1 Descrição do caso de estudo II

A *Figura 29* mostra uma representação geral da planta correspondente ao presente estudo de caso. O esquema identifica um reservatório a montante (REVM), e outro a jusante (REVJ). A disponibilidade destes elementos vai depender do volume de água disponível nesses reservatórios, identificado mediante o uso de dois indicadores de nível de água máximo e mínimo. Os nodos (UG1 e UG2) representam duas unidades geradoras idênticas, cada uma delas com a capacidade de produzir 100% da demanda de energia planejada. No desenho é representado também, o transformador (TR), na saída dos geradores. A disponibilidade deste elemento é avaliada em função do estado do próprio equipamento e da disponibilidade do sistema de resfriamento do transformador (RTR).

As unidades geradoras (UG) estão formadas por uma comporta no canal de adução (CM), e outra comporta no canal de sucção (CJ), dispostas em ambos os lados da turbina (TUR) a qual está acoplada ao gerador elétrico (GER). A disponibilidade das comportas (CM e CJ) é avaliada pela probabilidade de falha do equipamento, entanto as disponibilidades da turbina e do gerador dependem da falha do próprio equipamento ou dos sistemas de apoio a esses equipamentos, representados como (SRV), sistema de regulação de velocidade da turbina, e (SAI) sistema anti-incêndio do gerador.

O SRV da turbina, representado na *Figura 30*, garante as revoluções necessárias para gerar energia em uma frequência estável, o que possibilitará a sincronização da usina ao sistema elétrico de potência (SEP). O SRV está formado por um tanque de óleo (TQO), e duas linhas de serviço idênticas, cada uma delas com total capacidade de regular a velocidade da turbina.

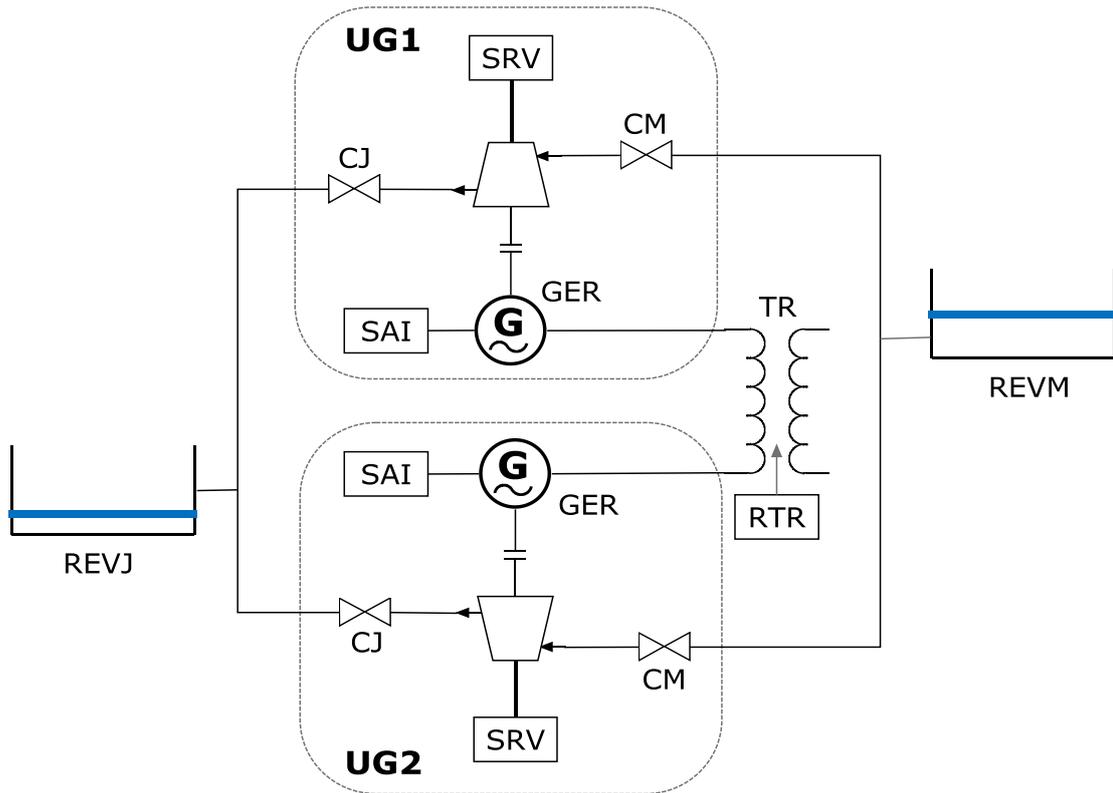


Figura 29 – Representação simplificada da UHE utilizada como Estudo de Caso II.

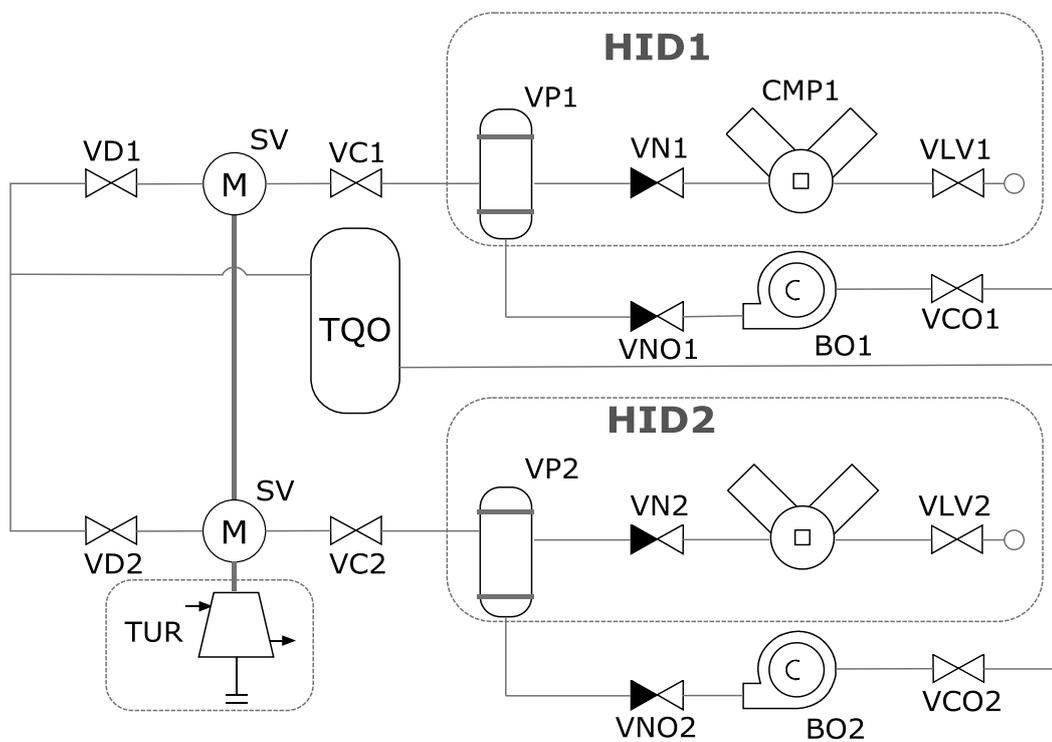


Figura 30 – Sistema de Regulação de Velocidade (SRV) da turbina no Estudo de Caso II.

Cada linha redundante do (SRV) compreende uma válvula de drenagem (VD), um servomotor (SV), uma válvula de controle (VC), uma central hidráulica (HID) e uma linha de óleo. Ao tempo que a (HID) de ambas as linhas está composta por um vaso de pressão (VP), uma válvula de não retorno (VN), um compressor de ar (CMP) e uma válvula de entrada (VLV). As linhas de óleo possuem uma válvula de não retorno (VNO), uma bomba de óleo (BO) e uma válvula de controle de óleo (VCO), ambas as linhas conectadas ao mesmo tanque de óleo. A disponibilidade dos equipamentos do (SRV) é avaliada em dependência da falha de cada um de seus componentes, com exceção das bombas e dos compressores os quais dependem adicionalmente da alimentação elétrica (AE), do sistema de lubrificação (LB) ou do sistema de controle associado e eles (SC).

O sistema anti-incêndio do gerador elétrico (SAI), representado na *Figura 31*, compreende um compressor (CMP) um vaso de pressão (VP) com  $\text{CO}_2$  e duas linhas redundantes encarregadas de levar o gás até a sala do gerador. Cada uma das linhas por separado está desenhada para extinguir qualquer incêndio que ocorra na sala do gerador. As linhas que transportam o  $\text{CO}_2$  incluem uma válvula pneumática (VA), uma válvula de não-retorno (VN) e um dispersor do gás (DSP). O acionamento da válvula (VA) é realizado por uma válvula solenoide (VS) e o tanque de ar pressurizado (TA). A disponibilidade dos componentes do (SAI) é estimada em termos das falhas de cada um dos respectivos componentes.

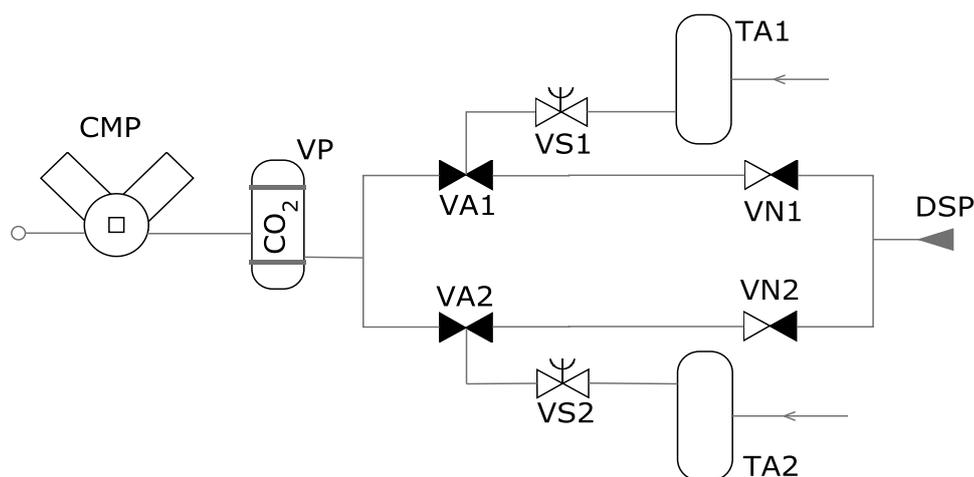


Figura 31 – Sistema Anti-Incêndio (SAI) do gerador no Caso de Estudo II.

Por último o sistema de apoio do transformador, o sistema (RTR) é responsável pelo resfriamento do transformador (TR). Este sistema está composto por um tanque de água (TQA) e duas linhas de condução redundantes, conforme mostra a *Figura 32*. Cada uma das

linhas de condução por separado tem a capacidade de manter a temperatura do transformador dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante.

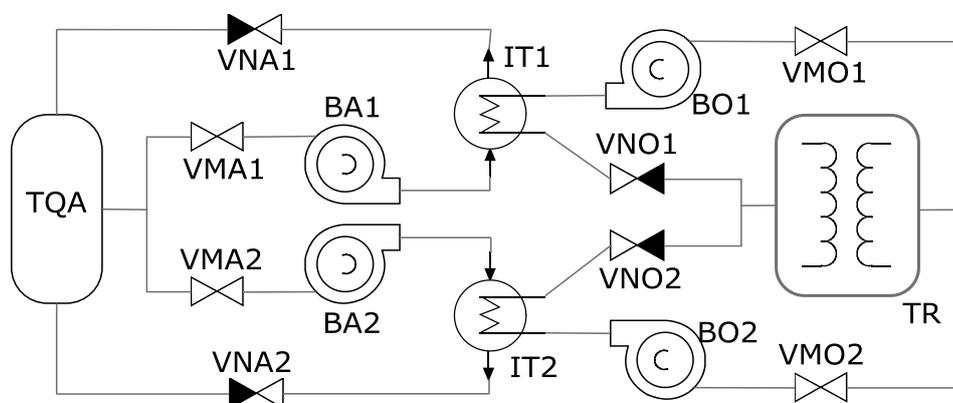


Figura 32 – Sistema de Resfriamento do Transformador (RTR) no Caso de estudo II.

Cada uma das linhas do (RTR) está composta por um sistema de água (RTR-LA), um trocador de calor (IT) e um sistema de óleo (RTR-LO). O sistema de água está formado por uma válvula manual (VMA), uma bomba de água (BA), e uma válvula de não retorno (VNA). O sistema de óleo inclui uma válvula manual (VMO), uma bomba de óleo (BO) e uma válvula de não retorno (VNO). A disponibilidade de cada um dos componentes deste sistema depende da falha do equipamento correspondente, excluindo as quatro bombas que adicionalmente podem ficar indisponíveis devido a problemas na alimentação elétrica (AE), lubrificação (LB) ou falhas no sistema de controle (SC).

O modelo de usina hidrelétrica apresentado na presente seção está composto por 49 CANs e 103 CBNs, sendo um total de 152 componentes. Uma melhor perspectiva destes elementos pode-se observar na *Tabela 10*, onde se encontra representada a matriz de dependências do sistema associado ao caso de estudo II.

Na continuação são descritos os cenários de teste, que descrevem a falha de alguns dos componentes do estudo de caso analisado, mediante os quais será avaliado o funcionamento das metodologias MMD e MPM:

- Cenário I: encontram-se indisponíveis a bomba de óleo da segunda linha de óleo (RTR-BO2-AE) por falha na alimentação elétrica e o trocador de calor da linha um (RTR-IT1), ambos formam parte do sistema de resfriamento do transformador.
- Cenário II: estão falhados válvula de não retorno da segunda linha de óleo (RTR-VNO2) do sistema de resfriamento do transformador e a válvula pneumática da linha

um (UG1-SAI-VA1) do sistema anti-incêndio do gerador, este último pertencente a unidade geradora um (UG1).

- Cenário III: está afetado o nível de água do reservatório a jusante (N1J).
- Cenário IV: no teste estão indisponíveis a bomba de óleo (UG1-SRV-BO2) pertencente ao sistema de regulação de velocidade da unidade geradora (UG1), e uma válvula de não retorno (RTR-VNA2) do sistema de resfriamento do transformador.
- Cenário V: Neste caso é adicionado ao cenário anterior o tanque de óleo (UG1-SRV-TQO) do sistema de regulação de velocidade da unidade geradora (UG1).
- Cenário VI: esta afetado o tanque de água (RTR-TQA) do sistema de resfriamento do transformador.

Uma descrição detalhada do caso de estudo II e os cenários propostos é oferecida no Anexo B.

### 5.3.2 Resultados do MMD

Os procedimentos de aplicação das metodologias descritas neste trabalho e os processos que elas realizam, tem um comportamento padrão, independentemente da planta que esteja sendo avaliada. Nesse sentido, na aplicação dos métodos neste caso de estudo, somente serão apresentados os resultados para os cenários propostos.

Da mesma forma que o Caso de Estudo I, a presente análise foi baseada na avaliação de seis situações, descritas anteriormente e resumidas na *Tabela 9*, onde adicionalmente são mostrados os resultados da disponibilidade final do sistema estudado na avaliação de cada cenário pelo MMD.

Tabela 9 – Cenários e resultados da aplicação do MMD ao Caso de Estudo II.

<b>Cenário</b>	<b>Componentes Indisponíveis</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema</b>
<b>I</b>	RTR-IT1, RTR-BO2-AE	Indisponível
<b>II</b>	UG1-SAI-VA1, RTR-VNO2	Muito Degradado
<b>III</b>	N1J	Indisponível
<b>IV</b>	UG1-SRV-BO2, RTR-VNA2	Muito Degradado
<b>V</b>	UG1-SRV-BO2, RTR-VNA2, UG1-SRV-TQO	Muito Degradado
<b>VI</b>	RTR-TQA	Indisponível

Tabela 10 – Matriz de dependências associada à UHE avaliada no Estudo de Caso II.

(Continua)

Nível	Equipamentos	Dependências						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1

5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

(Conclusão)

A matriz de dependências derivada do sistema analisado no presente caso de estudo, está representada na *Tabela 10*. Esta estrutura possui 49 linhas correspondentes aos CANs do sistema, as quais estão distribuídas em sete níveis de dependências. O número de colunas associado ao número máximo de dependências para um CAN, neste sistema vai ser de sete elementos.

As propagações direta e indireta, feitas pelos algoritmos de varredura sobre a matriz de dependências, estão representadas na *Figura 33*, processo que pertence à avaliação realizada para o Cenário I do presente estudo de caso, onde as estruturas mostradas correspondem à coluna dos equipamentos da matriz. Na representação, somente são mostrados os elementos envolvidos nos processos de propagação, de forma que (a) mostra o processo após a propagação direta, e (b) o resultado final da aplicação do método após a varredura indireta, mostrando o estado final para cada um dos CANs ou subsistemas afetados, incluído o estado final do sistema (US).

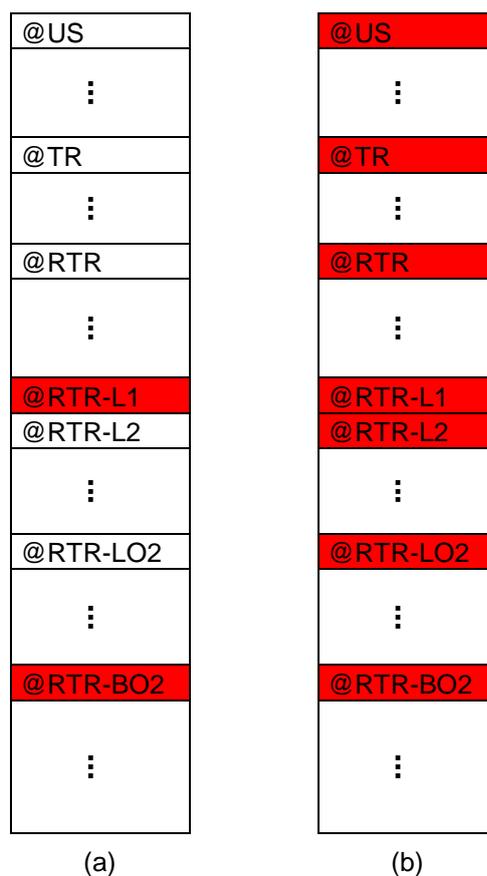


Figura 33 – Estado dos equipamentos após aplicação do algoritmo de varredura para o cenário I do caso de estudo II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Na propagação realizada na *Figura 33a*, o estado dos CANs (RTR-BO2 e RTR-L1) é indisponível como consequência da indisponibilidade dos CBNs (RTR-VNO2 e RTR-IT1), na entrada de dados. Em seguida na propagação indireta que compreende a propagação das indisponibilidades dos CANs (RTR-LO2 e RTR-L1) e percorrendo a matriz de dependências resultou na indisponibilidade de outros quatro CANs: os sistemas (RTR-L2, RTR, TR) e a própria usina (US).

Para os seis cenários propostos os processos de propagação de falhas e os cálculos de disponibilidade foram feitos manualmente, e verificou-se, desta forma a corretude dos resultados gerados pelo código computacional.

### 5.3.3 Resultados do MPM

A aplicação do método MPM para cada um dos cenários construídos neste caso de estudo teve como resultados os valores mostrados na *Tabela 11*. Fazendo uma rápida inspeção dos valores calculados da disponibilidade final do sistema, é possível corroborar os resultados já obtidos pelo método MMD, sendo que existe uma similitude entre os valores de disponibilidade resultantes de ambas as metodologias nas seis situações estudadas, sendo que nos Cenários I e III o sistema fica indisponível, e nos restantes o sistema encontra-se muito degradado.

Tabela 11 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MPM, correspondentes ao Estudo de Caso II.

<b>Cenário</b>	<b>Componentes Indisponíveis</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema</b>
<b>I</b>	RTR-IT1, RTR-BO2-AE	0,0
<b>II</b>	UG1-SAI-VA1, RTR-VNO2	0,5
<b>III</b>	N1J	0,0
<b>IV</b>	UG1-SRV-BO2, RTR-VNA2	0,5
<b>V</b>	UG1-SRV-BO2, RTR-VNA2, UG1-SRV-TQO	0,5
<b>VI</b>	RTR-TQA	0,0

Produto da grande quantidade de elementos que tem o sistema, e tendo em conta que no Caso de Estudo I foi analisada a construção das estruturas necessárias para realizar o cálculo de disponibilidade pelo método MPM, na presente seção não serão apresentados estes operadores, produto das dimensões que eles têm.

Seguindo a mesma linha de apresentação dos resultados utilizada no Caso de Estudo I, vamos mostrar os resultados dos Cenários I e III, mudando as disponibilidades de entrada dos dispositivos, com finalidade de conhecer o impacto causado pelo deterioro progressivo dos componentes envolvidos em cada cenário sobre a disponibilidade do sistema, isto é, a sensibilidade do sistema a estes componentes.

A *Figura 34* mostra uma análise de sensibilidade feita para o Cenário I, onde, supondo uma disponibilidade constante da alimentação elétrica na bomba de óleo do sistema de resfriamento (RTR-BO2-AE), já degradada pelo uso, e uma disponibilidade do trocador de calor (RTR-IT1) decrescente linearmente, a disponibilidade do sistema vai se comportar de forma que, decresce linearmente até o ponto onde a geração não pode acompanhar a demanda planejada, momento no qual o sistema fica indisponível.

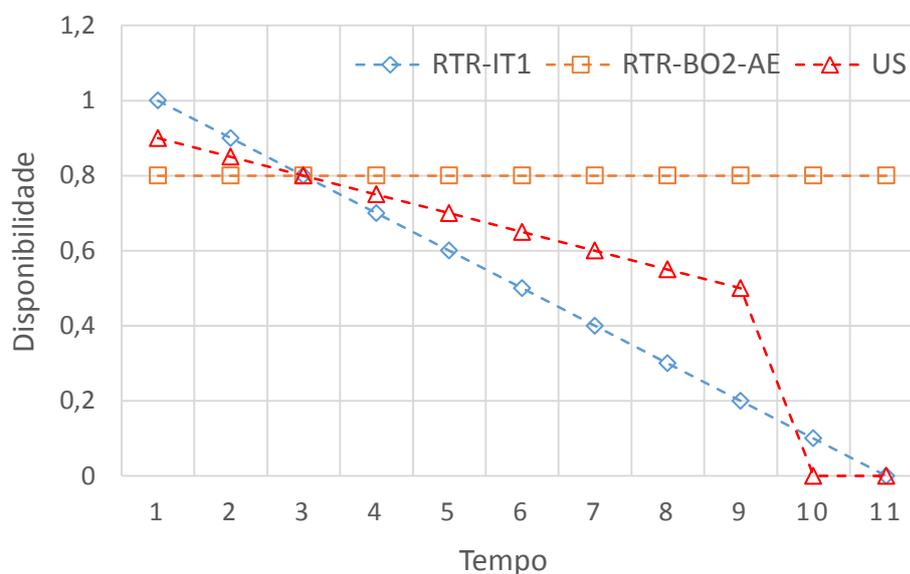


Figura 34 – Análise de sensibilidade do impacto da degradação linear do trocador de calor (RTR-IT1) sobre a disponibilidade do sistema, considerando a disponibilidade da alimentação elétrica da bomba de óleo (RTR-BO2-AE) degradada e constante, e os restantes componentes totalmente disponíveis, numa escala de tempo genérica.

Na análise de sensibilidade do Cenário III, apresentada na *Figura 35*, o comportamento da disponibilidade no reservatório a jusante, caracterizado pela variação do nível de água de forma linear decrescente, vai ter uma influência direta sobre a disponibilidade total do sistema, de forma que o valor de disponibilidade resultante acompanha o valor de disponibilidade de entrada em todo momento.

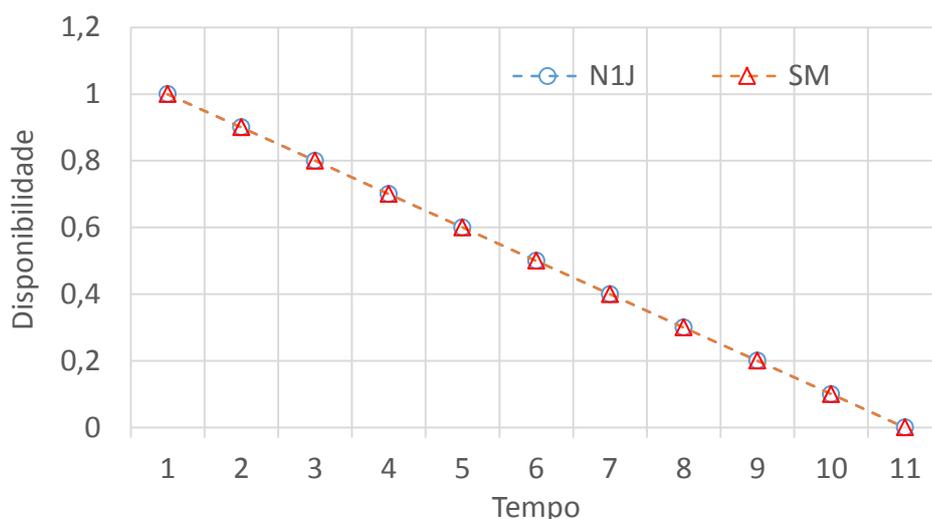


Figura 35 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário III sobre a disponibilidade do sistema, numa escala de tempo genérica.

Novamente observamos que o método MPM permite realizar análises dinâmicas da disponibilidade de sistemas considerando a degradação contínua dos componentes em operação. As análises de sensibilidade correspondentes aos restantes cenários podem ser encontradas no *Anexo B*.

#### 5.4 Análises de disponibilidade e busca de configurações críticas

As análises de disponibilidade incluem como principal objetivo determinar as combinações de componentes que podem levar a falha do sistema ou criar uma situação de gravidade, essas combinações podem ser denominadas como configurações críticas do sistema.

A partir das metodologias estudadas neste trabalho (MMD e MPM) é possível construir um algoritmo para determinar as configurações críticas num sistema. A busca de conjuntos ou configurações críticas compreende uma varredura pelas combinações dos componentes do sistema e a verificação da disponibilidade do mesmo. Nesse sentido a Figura 36 mostra o diagrama de fluxo correspondente ao algoritmo de busca dessas configurações críticas.

Após a aplicação do algoritmo de obtenção de configurações críticas, são conhecidas as possíveis combinações, sendo classificadas de acordo ao estado resultante do sistema e o número de elementos envolvidos no processo. A *Tabela 12* mostra algumas das configurações

que provocam a indisponibilidade do sistema, classificadas por número de elementos envolvidos.

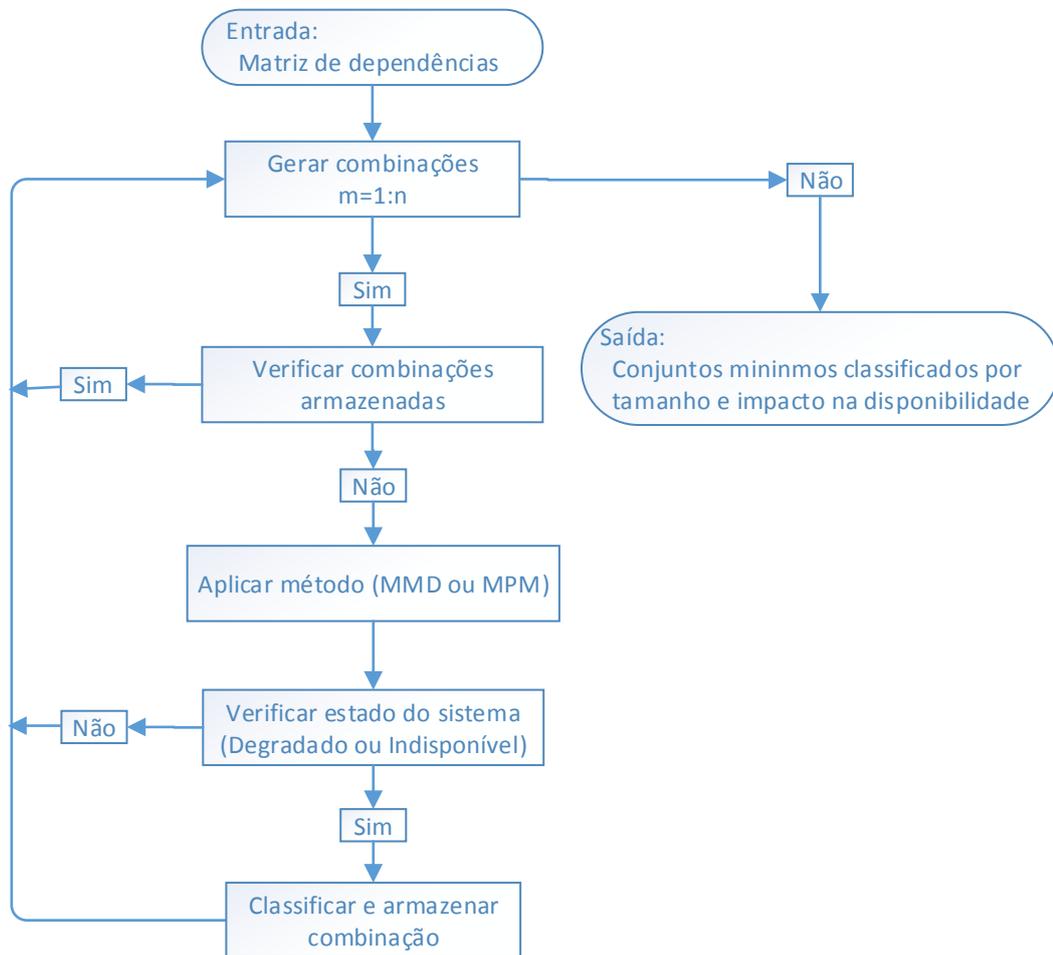


Figura 36 – Diagrama de fluxo do algoritmo de busca de configurações críticas.

Tabela 12 – Exemplos de configurações críticas do sistema analisado no Estudo de Caso I.

Número de elementos			
1	2	3	
NIV1		FLU1, FLU2, FLU3	FLU1, AIR2, VOL3
NIV2		FLU1, FLU2, VOL3	FLU1, AIR2, AIR3
NIV3		FLU1, FLU2, AIR3	FLU1, AIR2, VIC3
NIV4		FLU1, FLU2, VIC3	FLU1, VIC2, FLU3
VOLG		FLU1, VOL2, FLU3	FLU1, VIC2, VOL3
		FLU1, VOL2, VOL3	FLU1, VIC2, AIR3
		FLU1, VOL2, AIR3	FLU1, VIC2, VIC3
		FLU1, VOL2, VIC3	...
		FLU1, AIR2, FLU3	(Outras configurações)

No processo de formação dos novos conjuntos de elementos, de acordo ao fluxograma da Figura 36 excluem-se as combinações que incluam outras combinações com inferior número de elementos. A *Tabela 13* mostra algumas das configurações que causam indisponibilidade no sistema apresentado no Estudo de Caso II.

Tabela 13 – Exemplos de configurações críticas do sistema analisado no Estudo de Caso II.

Número de elementos			
1	2	3	...
N1J	UG1-CM, UG2-CM	UG1-CM, UG2-SAI-VA1, UG2-SAI-VA2	
N2J	UG1-CM, UG2-CJ	UG1-CM, UG2-SAI-VA1, UG2-SAI-VS2	
N1M	UG1-CJ, UG2-CM	UG1-CM, UG2-SAI-VA1, UG2-SAI-TA2	
N2M	UG1-CJ, UG2-CJ	UG1-CM, UG2-SAI-VA1, UG2-SAI-VN2	
TR	RTR-VNA1, RTR-VMA2	UG1-CM, UG2-SAI-VS1, UG2-SAI-VA2	
RTR-TQA	RTR-VNA1, RTR-VNA2	UG1-CM, UG2-SAI-VS1, UG2-SAI-VS2	
	RTR-VNA1, RTR-BA2	UG1-CM, UG2-SAI-VS1, UG2-SAI-TA2	
	RTR-VNA1, RTR-IT2	UG1-CM, UG2-SAI-VS1, UG2-SAI-VN2	
	RTR-VNA1, RTR-VNO2	UG1-CJ, UG2-SRV-VD1, UG2-SRV-VD2	
	RTR-VNA1, RTR-BO2	UG1-CJ, UG2-SRV-VD1, UG2-SRV-VC2	
	RTR-VNA1, RTR-VMO2	UG1-CJ, UG2-SRV-VD1, UG2-SRV-VD2	
	...	...	
	(Outras configurações)	(Outras configurações)	

Nesta seção somente foram analisadas as configurações que provocam a indisponibilidade do sistema, embora seja possível também, estimar configurações que levem ao sistema aos estados degradados e muito degradados.

## 5.5 Comparação das metodologias MMD e MPM

Depois de estudados os resultados obtidos para os Casos de Estudo I e II, considerando os cenários envolvidos na avaliação das metodologias de análises de disponibilidade, é possível enunciar algumas conclusões básicas, referentes ao funcionamento desses modelos, estas conclusões são resumidas na *Tabela 14*.

Conforme descrito nos capítulos anteriores à diferença entre os tipos de abordagens, praticamente identifica o resto das características intrínsecas aos modelos, lembrando que as análises realizadas estão encaminhas a calcular a disponibilidade instantânea do sistema, tendo como dados de entrada a disposição do sistema em matrizes de dependências e os valores de disponibilidade instantâneas dos CBNs. Nas questões de desempenho, evidentemente o MPM tem um rendimento inferior, determinado pelo processo iterativo de

cálculo e o conjunto de estruturas de dados utilizadas para esse fim. Entretanto, o uso de método justifica-se em seu caráter quantitativo.

Tabela 14 – Comparação dos principais aspectos das metodologias de análises de disponibilidade MMD e MPM.

<b>Aspectos avaliados</b>	<b>MMD</b>	<b>MPM</b>
Tipo de Abordagem	Qualitativa	Quantitativa
Espaço de estados	Escala de cores (5 níveis)	Intervalo: [0, 1]
Uso de matrizes de dependências	Sim	Sim
Variabilidade da disponibilidade dos CBNs	Não	Sim
Uso de vetor com elementos indisponíveis	Sim	Sim
Informação de disponibilidade inicial	Necessária	Necessária
Informação Visual	Sim	Não
Análises de configurações perigosas	Sim	Sim
Avaliação de disponibilidade	Sim	Sim
Avaliação de confiabilidade	Sim	Sim
Associação a outras técnicas	FMEA, Cut-Set	Markov
Consumo de memória	$n$	$2n(n+1)$
Tempo de cômputo	$O(N_{CAN}^2)$	$O(n^2)$

## 5.6 Resumo do capítulo

O presente capítulo foi destinado a introduzir as estruturas de armazenamento de dados e as classes empregadas para desenvolver as metodologias de análises de disponibilidade Método de Matrizes de Dependências e Método de Propagação de Markov. Sendo feita em cada caso uma pequena abordagem das formas de utilização e emprego destas estruturas computacionais nos problemas analisados. Adicionalmente, foram apresentados dois casos de estudo, sendo eles a representação de duas UHE, uma usina genérica simplificada e um modelo de uma usina real. A partir destes estudos de caso avaliou-se o correto funcionamento das metodologias criadas e dos códigos computacionais envolvidos, mediante as simulações associadas aos cenários de falha propostos para cada caso de estudo. Finalmente, foi feita uma comparação entre as duas metodologias propostas neste trabalho.

## **CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

As pesquisas desenvolvidas no presente trabalho estiveram direcionadas à avaliação e análises de disponibilidade em sistemas industriais. Especificamente foram construídas, duas metodologias para calcular a disponibilidade em usinas hidrelétricas, aproveitando as características da disposição em série e paralelo dos elementos que compõem o sistema, e as representações deles utilizando matrizes de dependências. No projeto foram avaliados com sucesso vários modelos de usinas, sendo apresentados neste trabalho somente dois desses modelos. Essa avaliação foi realizada de acordo à execução de diversos cenários de estudo, com situações escolhidas de forma aleatória, visando simular eventos que podem acontecer num ambiente de funcionamento real.

Entre os principais atrativos das metodologias de análises de disponibilidade construídas encontram-se:

- permitem avaliação qualitativa e quantitativa de disponibilidade;
- facilidade na compreensão da evolução das falhas como resultado do uso de matrizes de dependências na representação dos sistemas;
- cálculo de disponibilidade realizado a partir de valores instantâneos dos dispositivos do sistema, porém, sem necessidade da utilização de dados previamente armazenados, ou bancos de dados históricos;
- heurísticas ou métodos matemáticos de cálculo relativamente simples;
- rapidez no desenvolvimento e implantação dos códigos computacionais;
- baixo uso de recursos computacionais (memória e tempo de processamento);
- avaliação simultânea de múltiplos empreendimentos ou cenários com igual foco de trabalho.

A primeira das metodologias desenvolvidas (Método de Matrizes de Dependências), consiste numa abordagem qualitativa, na qual cada elemento analisado da usina, incluído os sistemas e subsistemas, são representados numa estrutura de matrizes de dependências, os estados de disponibilidade são identificados seguindo a uma escala qualitativa de cores, que propõe cinco níveis de disponibilidade para representar o estado de cada elemento. O cálculo da disponibilidade do sistema é realizado de forma que, conhecendo o valor de disponibilidade dos componentes de baixo nível, perante alguma mudança experimentada nesses estados, são disparados algoritmos de varredura, encarregados de propagar os estados de disponibilidade na matriz até ser atingido o componente de alto nível que representa a usina. O processo atualiza também os estados dos restantes componentes na matriz, brindando uma informação abrangente do nível de disponibilidade de cada um dos subsistemas da usina.

O modelo em questão proporciona aos analistas e operadores do sistema uma ferramenta simples de análises de disponibilidade, com a vantagem de ter uma interface visual do sistema, representada em matrizes de dependências, que incrementa a interatividade desses usuários com a dinâmica do sistema avaliado, dando uma visão geral do estado de disponibilidade do sistema e de cada um de seus componentes.

As principais contribuições deste trabalho em relação ao MMD foram: (i) aplicação da metodologia à análises de disponibilidade em usinas hidrelétricas; (ii) introdução de um método de ordenação da matriz de dependências segundo níveis de componentes, que permite aumentar significativamente o desempenho computacional do algoritmo de propagação de dependências, passando de um algoritmo recursivo a um algoritmo com custo polinomial.

Como consequência das restrições da avaliação qualitativa, localizadas no domínio de estados de disponibilidade definidos para o método, em situações onde existam pequenas mudanças na disponibilidade de um componente, a degradação acontecerá de forma inadvertida, provocando uma perda de informação nos usuários finais. Perante esta situação foi desenvolvida outra metodologia de análises com a finalidade de complementar os resultados obtidos e reproduzir com maior precisão o comportamento dos sistemas.

A segunda metodologia de avaliação de disponibilidade construída (Método de Propagação de Markov), propõe uma abordagem quantitativa de análise de disponibilidade, no sentido que, os estados dos sistemas são representados de acordo a uma escala numérica contínua, com valores entre 0 e 1. Esta técnica apresenta similaridade em relação as técnicas suportadas nas teorias de Markov, e consiste na avaliação quantitativa de disponibilidade,

mediante a aplicação iterativa de dois operadores matriciais ou matrizes de transição, sobre um vetor com os valores de disponibilidade inicial do sistema avaliado, o processo termina ao satisfazer por um critério de convergência pré-estabelecido que representa o fim da propagação das dependências, o vetor de disponibilidade contém o estado final do sistema e de seus componentes. Da mesma forma que o primeiro método, os valores de disponibilidade são calculados para cada um dos componentes do sistema.

A técnica de propagação Markoviana, não somente é capaz de reproduzir com maior precisão a disponibilidade de um sistema, ademais, o uso de pequenas alterações na disponibilidade dos componentes de entrada baseados na degradação progressiva ou funções de probabilidades de falhas, podem ser analisados numa escala de tempo genérica, tendo como resultado uma análise de sensibilidade do impacto do deterioro desses componentes sobre a disponibilidade do sistema.

A principal contribuição deste trabalho em relação ao método MPM foi o desenvolvimento dos operadores e o algoritmo de cálculo de um novo método, semelhante aos métodos Markovianos, que utiliza a MD como mecanismo de representação do sistema e permite a avaliação quantitativa de disponibilidade em sistemas industriais.

Voltando ao ponto de partida, o estudo do funcionamento dos métodos e dos resultados obtidos nas análises das usinas hidrelétricas constatou que é factível a avaliação de disponibilidade nestes empreendimentos utilizando as técnicas descritas. A modo de confirmação, a validação dos modelos foi realizada em três direções: inicialmente utilizando a comparação dos resultados de ambos os métodos; em segundo lugar, realizando uma inspeção visual das propagações realizadas; e por último, foi comprovada numericamente a veracidade dos resultados obtidos. Entretanto, cenários muito complexos com elevados números de componentes devem ser testados e comparados os resultados com os oferecidos por programas comerciais.

Em relação às metodologias clássicas de análises de disponibilidade, os modelos desenvolvidos na presente pesquisa, oferecem uma estrutura acessível, simples de implementar, que não incorpora complexas análises matemáticas, o que possibilita uma rápida absorção da tecnologia, fazendo os métodos ideais para a avaliação de empreendimentos de meio e pequeno porte, ou nas etapas iniciais de exploração de uma planta.

Resulta importante destacar, que o principal ponto negativo das metodologias propostas é, que no momento, não permitem identificar nas análises de disponibilidade as

falhas dependentes ou de causa comum, ou seja, nestes casos informam a disponibilidade do sistema pero não alertam sobre a ocorrência deste tipo de falhas. Pela importância destas falhas nas análises de segurança e confiabilidade de sistemas industriais, no futuro devem ser incluídas mudanças nas metodologias que complementem os resultados das análises.

Outro aspecto negativo destas metodologias, presente em maior grau nas avaliações pelo método de propagação Markoviana, está relacionada ao comportamento dos códigos quando o número de componentes que formam sistema é muito grande, esta dificuldade é intrínseca as operações de cálculo e armazenamento no processamento de matrizes muito grandes. Neste sentido, entre os trabalhos futuros desta pesquisa, encontra-se a implementação dos códigos computacionais introduzindo diretivas de paralelização e a utilização de processadores gráficos para realizar as operações entre matrizes. Outro caminho para amenizar os custos computacionais incluem o uso de matrizes esparzas nas representações de operadores matemáticos do método MPM. Por outra parte, relacionado ao domínio de aplicação dos métodos, seria interessante estender as análises a outros sistemas industriais com alto perigo operacional como a indústria aeroespacial ou nuclear, assim como comparar os resultados com programas comerciais profissionais.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5462, Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ALFARO, G. M.; DOMINGUEZ, D. S. Matrizes de Dependências Aplicadas ao Controle de Disponibilidade em Usinas Hidrelétricas. Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe. **Anais...**, 2014. Feira de Santana.

ANEEL. Relatório de gestão do exercício de 2011. , 2012. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/portalmme/opencms/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_m\\_ineracao\\_brasileira/P09\\_RT18\\_Perfil\\_da\\_Minerao\\_de\\_Ferro.pdf](http://www.mme.gov.br/portalmme/opencms/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_m_ineracao_brasileira/P09_RT18_Perfil_da_Minerao_de_Ferro.pdf)>. Acesso em: 4/10/2014.

ANEEL. Banco de Informações de Geração. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. .

BAUER, E.; ZHANG, X.; KIMBER, D. **Practical System Reliability**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability evaluation of power systems**. London, 1984.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **The Unified Modeling Language User Guide**. 1998.

BOUROUNI, K. Availability assessment of a reverse osmosis plant: Comparison between Reliability Block Diagram and Fault Tree Analysis Methods. **Desalination**, v. 313, p. 66–76, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916412006200>>. Acesso em: 6/5/2014.

BRADT, D. Use reliability, availability and maintainability techniques to optimize system operation, *Hydrocarb. Process.*, 1997.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Pass 55 Asset management. Specification for the optimized management of physical assets. , 2008.

CHING, W.-K.; HUANG, X. **Markov Chains**. International Series in Operations Research and Management Science, 2013.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L. **Introduction to Algorithms , Second Edition**. 2001.

CRESPO MARQUEZ, A.; SÁNCHEZ HEGUEDAS, A.; IUNG, B. Monte Carlo-based assessment of system availability. A case study for cogeneration plants. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 88, n. 3, p. 273–289, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832004001838>>. Acesso em: 4/6/2014.

DEITEL, H. P. D. **Java How to Program (6th Edition) (How to Program (Deitel))**. 2004.

DEKKER, R.; GROENENDIJK, W. Availability assessment methods and their application in practice. **Microelectron. Reliab**, v. 35, p. 1257–1274, 1995.

DOMINGUEZ, D. S.; FRIAS, D. G.; OJEDA, M. P. Matrizes de Dependências e Sistemas Multiagentes no Monitoramento de Confiabilidade e Disponibilidade de Usinas Hidroelétricas. XIV Congresso Brasileiro de Energia. **Anais...**, 2012. Rio de Janeiro.

DOMINGUEZ, J. S.; FRIAS, D.; DOMINGUEZ, D. S.; VALLE, A. T.; OJEDA, M. P. A Comparative Study of Two Novel Reliability / Availability Calculation Methods Applied to a Hydroelectric Power Plant. International Youth Conference on Energy. **Anais...**, 2013.

FORNARI, G. Criação de um modelo para avaliação de disponibilidade de empreendimentos hidrelétricos utilizando matrizes de dependências. , 2013. Ilhéus: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ.

FUQUA, N. B. The Applicability of Markov Analysis Methods to Reliability, Maintainability, and Safety. **Reliability Analysis Center**, v. 10, n. 2, 2003.

IBGE. Anuário estatístico do Brasil. Disponível em:  
<[http://biblioteca.ibge.gov.br/d\\_detalhes.php?id=720](http://biblioteca.ibge.gov.br/d_detalhes.php?id=720)>. .

MARQUEZ, A. C.; HEGUEDAS, A. S. Models for maintenance optimization: a study for repairable systems and finite time periods. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 75, n. 3, p. 367–377, 2002. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832001001314>>. Acesso em: 4/6/2014.

MÉTAYER, Y.; HIRSCH, L. Primeros pasos en la gestión de riesgos. **Asociación Española de Normalización y Certificación**, 2008.

MOREIRA, R.; FRIAS, D.; DOMINGUEZ, D. S. Metodologia para Avaliação da Disponibilidade de Usinas Hidrelétricas para Apoio na Gestão de Ativos Físicos. VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energía Eléctrica. **Anais...**, 2013. Rio de Janeiro.

MOSQUEIRA, F. G.; NEGRÓN, A.; RAMOS, S.; POLANCO, C. Prebiotic Formation of Peptides: A Markov Chain Approach. **GENESIS - IN THE BEGINNING**. p.159–170, 2012.

MOSQUEIRA, F. G.; RAMOS-BERNAL, S.; NEGRÓN-MENDOZA, A. A simple model of the thermal prebiotic oligomerization of amino acids. **BioSystems**, 2000.

PUJOL, L.; PUJOL, A. Trabajos de reparación rotura de las cámaras de los difusores de la central hidroeléctrica río grande. **Comité Argentino de Presas**, 2013.

RAUSAND, M.; HOYLAN, A. **System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications**. 2004.

ROSENTHAL, J. S. Convergence rates for Markov chains. **Siam Review**, v. 37, p. 387–405, 1995. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2132659>>. .

ROUVROYE, J. .; BLIEK, E. . VAN DEN. Comparing safety analysis techniques. **Reliability Engineering & System Safety**, 2002.

RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I.; BOOCH, G. **The UML reference manual**. 1999.

SANTOS, L. DOS. **Gerenciamento de Riscos e Segurança de Sistemas**. São Paulo, 2003.

SEVÁ, A. O. Riscos de acidentes, de alterações hidrológicas e de sismos provocados ou induzidos por represas de hidrelétricas: formulação teórica, compilação de casos no exterior e no Brasil, e um alerta sobre os projetos no rio Ribeira de Iguape, PR-SP. , 2011.

SMITH, D. J. **Reliability, Maintainability and Risk**. 2011.

SUN, Y. **Reliability prediction of complex repairable systems: an engineering approach**, 2006. Queensland University of Technology. Disponível em: <<http://eprints.qut.edu.au/16273/>>. Acesso em: 4/8/2014.

VALLE, A. T.; OJEDA, M. P. Control de configuraciones peligrosas a través de matrices de dependencias en centrales nucleares. **Nucleus**, p. 8–15, 2010. Disponível em: <[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-084X2010000100002&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-084X2010000100002&nrm=iso)>. .

VESELY, W. E.; GOLDBERG, F. F.; ROBERTS, N. H.; HAASL, D. F. **Fault Tree Handbook**. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.

WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. **European Journal of Operational Research**, 2002.

WANG, W.; LOMAN, J. M.; ARNO, R. G.; et al. Reliability Block Diagram Simulation Techniques Applied to the IEEE Std. 493 Standard Network. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 40, n. 3, p. 887–895, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1300744>>. .

WUTTKE, R. A.; SELLITTO, M. A. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico availability and position in bath-tube curve. **Revista Produção**, v. VIII, 2008.

YANG, J.; ZHAO, K.; LI, L.; WU, P. Analysis on the causes of units 7 and 9 accidents at Sayano-Shushenskaya hydropower station. **Shuli Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering**, v. 30, p. 226–234, 2011.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – Resultados das análises correspondentes aos cenários do Caso de Estudo I

Tabela 15 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MMD e MPM, correspondentes ao Estudo de Caso I.

<b>Cenário</b>	<b>Componentes Indisponíveis</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema (MMD)</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema (MPM)</b>
<b>I</b>	FLU1	Degradado	0,75
<b>II</b>	FLU1, AIR3	Muito Degradado	0,50
<b>III</b>	FLU1, AIR3, VOL4	Indisponível	0,0
<b>IV</b>	FLU1, AIR3, VOL4,	Indisponível	0,0
<b>V</b>	NIV1	Muito Degradado	0,0
<b>VI</b>	NIV1, NIV3	Indisponível	0,0
<b>VII</b>	AIR2, VIC2	Degradado	0,75

Tabela 16 – Matriz de Dependências resultante do Cenário I, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(a)

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(b)

Figura 37 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário I, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

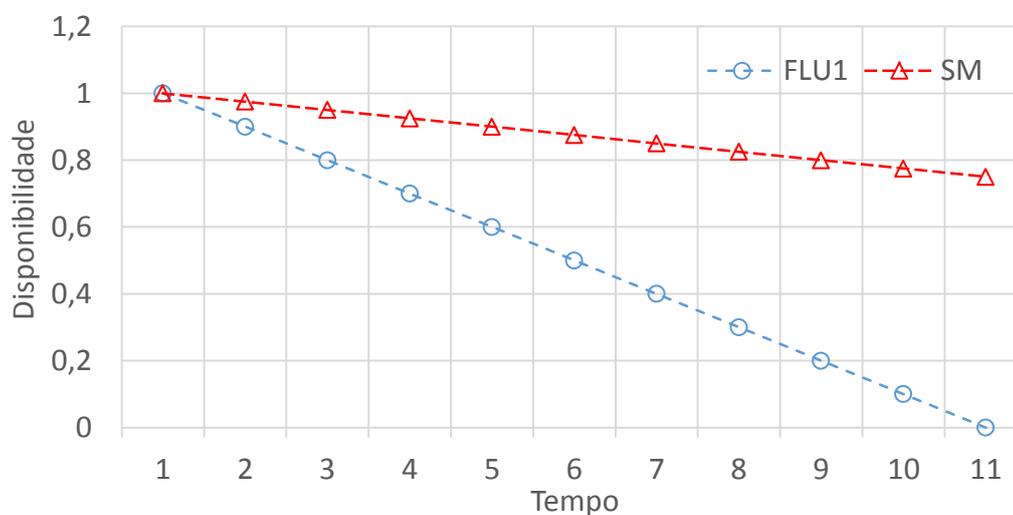


Figura 38 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário II (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

Tabela 17 – Matriz de Dependências resultante do Cenário II, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
		@RES1	@NODO	@RES2	@TR
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM	@SM
@NODO	@NODO
@RES1	@RES1
@RES2	@RES2
@TR	@TR
@LINHA1	@LINHA1
@LINHA2	@LINHA2
@LINHA3	@LINHA3
@LINHA4	@LINHA4
@TUR-GEN1	@TUR-GEN1
@TUR-GEN2	@TUR-GEN2
@TUR-GEN3	@TUR-GEN3
@TUR-GEN4	@TUR-GEN4
@VAL1	@VAL1
@VAL2	@VAL2
@VAL3	@VAL3
@VAL4	@VAL4

(a) (b)

Figura 39 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário II, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

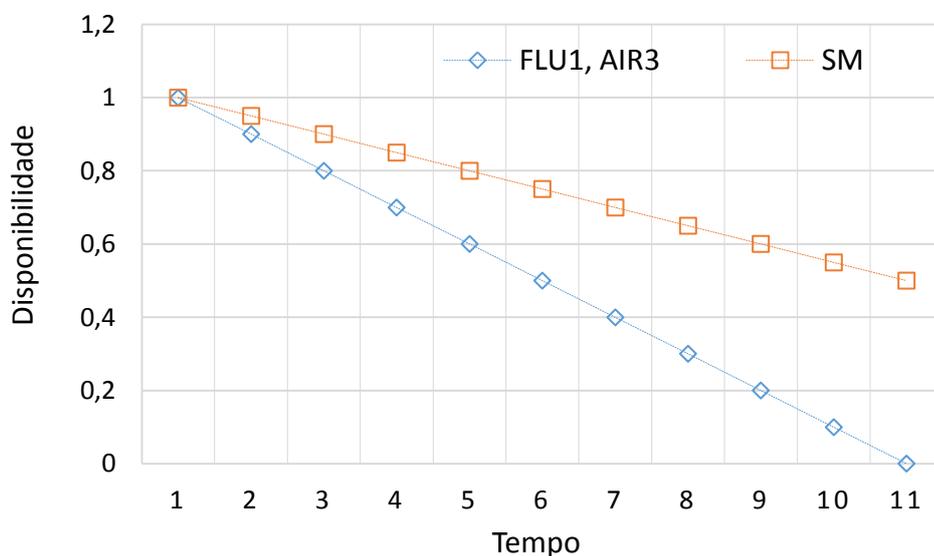


Figura 40 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário II (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

Tabela 18 – Matriz de Dependências resultante do Cenário III, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(a)

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(b)

Figura 41 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário III, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

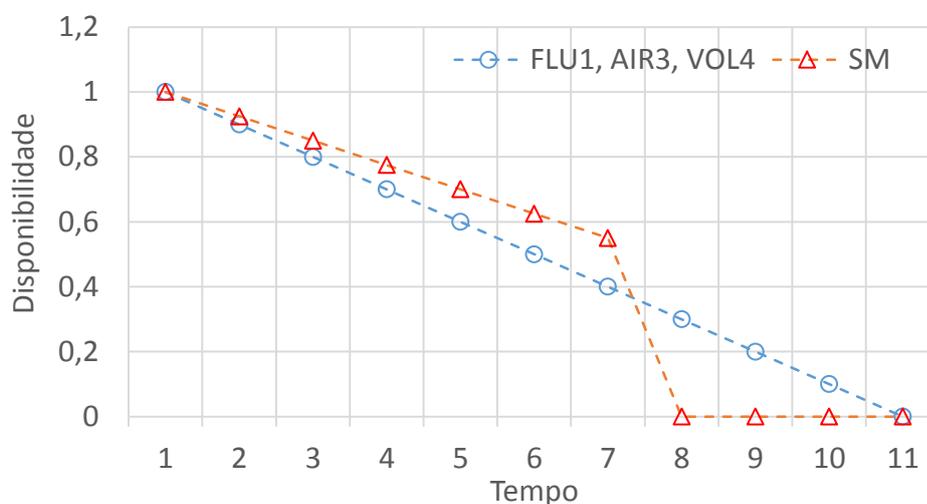


Figura 42 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário III (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

Tabela 19 – Matriz de Dependências resultante do Cenário IV, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM	@SM
@NODO	@NODO
@RES1	@RES1
@RES2	@RES2
@TR	@TR
@LINHA1	@LINHA1
@LINHA2	@LINHA2
@LINHA3	@LINHA3
@LINHA4	@LINHA4
@TUR-GEN1	@TUR-GEN1
@TUR-GEN2	@TUR-GEN2
@TUR-GEN3	@TUR-GEN3
@TUR-GEN4	@TUR-GEN4
@VAL1	@VAL1
@VAL2	@VAL2
@VAL3	@VAL3
@VAL4	@VAL4

(a) (b)

Figura 43 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário IV, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

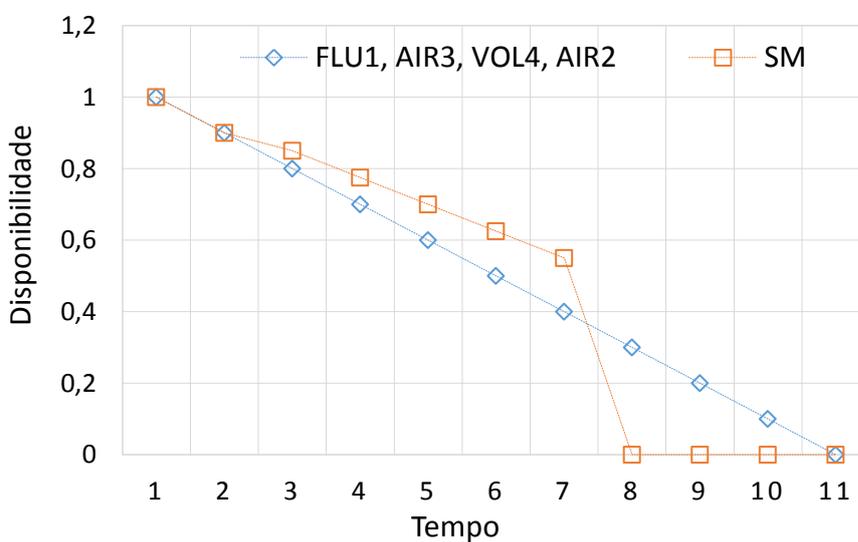


Figura 44 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário IV (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

Tabela 20 – Matriz de Dependências resultante do Cenário V, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(a)

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(b)

Figura 45 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário V, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

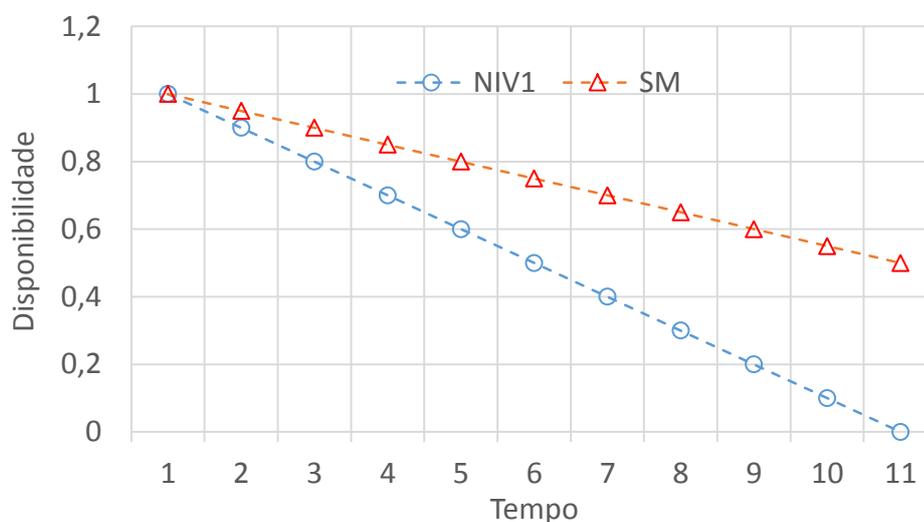


Figura 46 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário V (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

Tabela 21 – Matriz de Dependências resultante do Cenário VI, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM	@SM
@NODO	@NODO
@RES1	@RES1
@RES2	@RES2
@TR	@TR
@LINHA1	@LINHA1
@LINHA2	@LINHA2
@LINHA3	@LINHA3
@LINHA4	@LINHA4
@TUR-GEN1	@TUR-GEN1
@TUR-GEN2	@TUR-GEN2
@TUR-GEN3	@TUR-GEN3
@TUR-GEN4	@TUR-GEN4
@VAL1	@VAL1
@VAL2	@VAL2
@VAL3	@VAL3
@VAL4	@VAL4

(a) (b)

Figura 47 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário VI, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

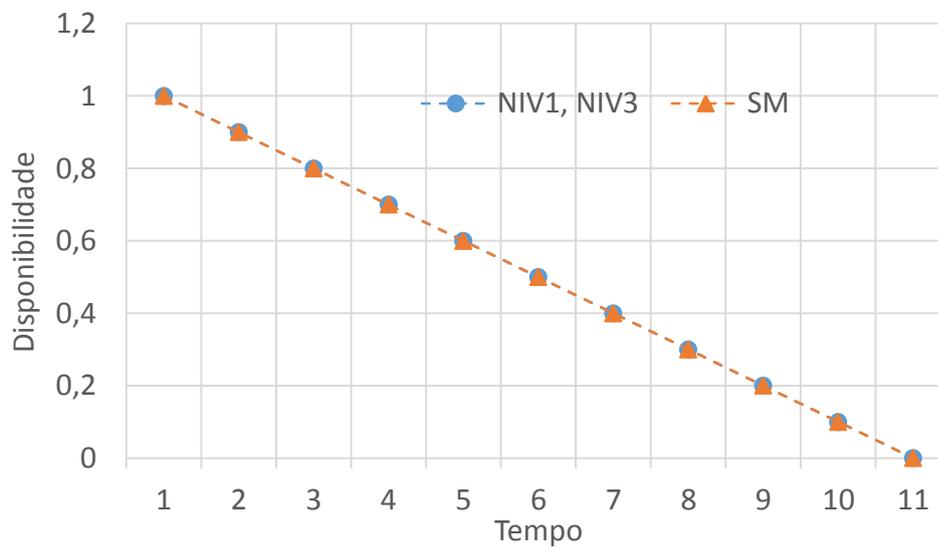


Figura 48 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário VI (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

Tabela 22 – Matriz de Dependências resultante do Cenário VII, Estudo de Caso I.

Nível	Equipamentos	Dependências			
1	@SM	@RES1	@NODO	@RES2	@TR
2	@NODO	R1:@LINHA1	R2:@LINHA2	R3:@LINHA3	R4:@LINHA4
2	@RES1	NIV1	NIV2		
2	@RES2	NIV3	NIV4		
2	@TR	VOLG			
3	@LINHA1	@TUR-GEN1	@VAL1		
3	@LINHA2	@TUR-GEN2	@VAL2		
3	@LINHA3	@TUR-GEN3	@VAL3		
3	@LINHA4	@TUR-GEN4	@VAL4		
4	@TUR-GEN1	FLU1	VOL1		
4	@TUR-GEN2	FLU2	VOL2		
4	@TUR-GEN3	FLU3	VOL3		
4	@TUR-GEN4	FLU4	VOL4		
4	@VAL1	AIR1	FS:VIC1		
4	@VAL2	AIR2	FS:VIC2		
4	@VAL3	AIR3	FS:VIC3		
4	@VAL4	AIR4	FS:VIC4		

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(a)

@SM
@NODO
@RES1
@RES2
@TR
@LINHA1
@LINHA2
@LINHA3
@LINHA4
@TUR-GEN1
@TUR-GEN2
@TUR-GEN3
@TUR-GEN4
@VAL1
@VAL2
@VAL3
@VAL4

(b)

Figura 49 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário VII, Estudo de Caso I: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

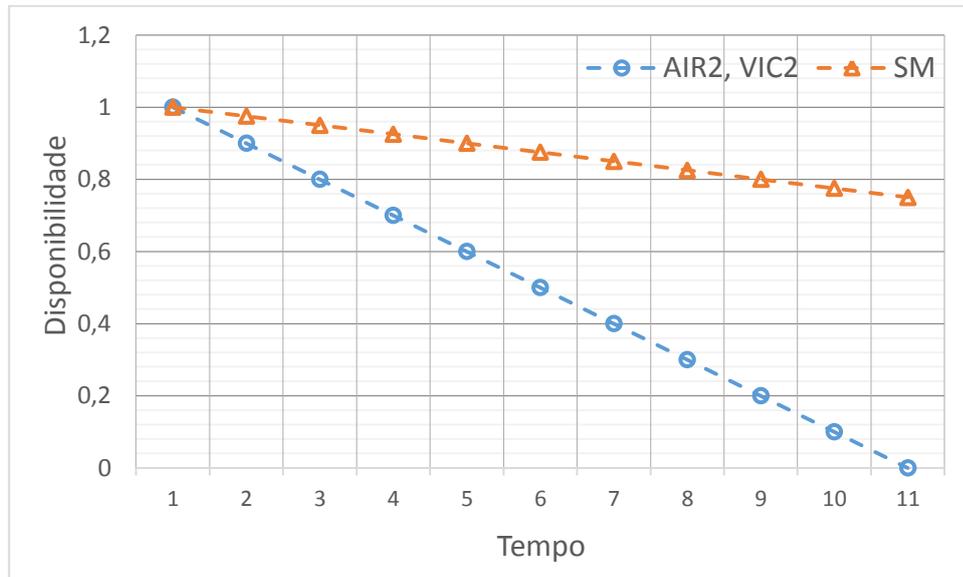


Figura 50 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário VII (Estudo de Caso I) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

## ANEXO B – Resultados das análises correspondentes aos cenários do Caso de Estudo II

Tabela 23 – Cenários de análises de disponibilidade e resultados do método MMD e MPM, correspondentes ao Estudo de Caso II.

<b>Cenário</b>	<b>Componentes Indisponíveis</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema (MMD)</b>	<b>Disponibilidade Final do Sistema (MPM)</b>
<b>I</b>	RTR-IT1, RTR-BO2-AE	Indisponível	0,0
<b>II</b>	UG1-SAI-VA1, RTR-VNO2	Muito Degradado	0,5
<b>III</b>	N1J	Indisponível	0,0
<b>IV</b>	UG1-SRV-BO2, RTR-VNA2	Muito Degradado	0,5
<b>V</b>	UG1-SRV-BO2, RTR-VNA2, UG1-SRV-TQO	Muito Degradado	0,5
<b>VI</b>	RTR-TQA	Muito Degradado	0,0

Tabela 24 – Matriz de Dependências resultante do Cenário I, Estudo de Caso II.

Nível	Equipamentos	Redundâncias						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1
5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

@US	@US
@REVJ	@REVJ
@REVM	@REVM
@TR	@TR
@UG1	@UG1
@UG2	@UG2
@RTR	@RTR
@UG1-GER	@UG1-GER
@UG1-TUR	@UG1-TUR
@UG2-GER	@UG2-GER
@UG2-TUR	@UG2-TUR
@RTR-L1	@RTR-L1
@RTR-L2	@RTR-L2
@UG1-SAI	@UG1-SAI
@UG1-SRV	@UG1-SRV
@UG2-SAI	@UG2-SAI
@UG2-SRV	@UG2-SRV
@RTR-LA1	@RTR-LA1
@RTR-LA2	@RTR-LA2
@RTR-LO1	@RTR-LO1
@RTR-LO2	@RTR-LO2
@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-L1
@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-L2
@UG1-SRV-L1	@UG1-SRV-L1
@UG1-SRV-L2	@UG1-SRV-L2
@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-L1
@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-L2
@UG2-SRV-L1	@UG2-SRV-L1
@UG2-SRV-L2	@UG2-SRV-L2
@RTR-BA1	@RTR-BA1
@RTR-BA2	@RTR-BA2
@RTR-BO1	@RTR-BO1
@RTR-BO2	@RTR-BO2
@UG1-SAI-VA1	@UG1-SAI-VA1
@UG1-SAI-VA2	@UG1-SAI-VA2
@UG1-SRV-BO1	@UG1-SRV-BO1
@UG1-SRV-BO2	@UG1-SRV-BO2
@UG1-SRV-HID1	@UG1-SRV-HID1
@UG1-SRV-HID2	@UG1-SRV-HID2
@UG2-SAI-VA1	@UG2-SAI-VA1
@UG2-SAI-VA2	@UG2-SAI-VA2
@UG2-SRV-BO1	@UG2-SRV-BO1
@UG2-SRV-BO2	@UG2-SRV-BO2
@UG2-SRV-HID1	@UG2-SRV-HID1
@UG2-SRV-HID2	@UG2-SRV-HID2
@UG1-SRV-CMP1	@UG1-SRV-CMP1
@UG1-SRV-CMP2	@UG1-SRV-CMP2
@UG2-SRV-CMP1	@UG2-SRV-CMP1
@UG2-SRV-CMP2	@UG2-SRV-CMP2

(a)

(b)

Figura 51 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário I, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Tabela 25 – Matriz de Dependências resultante do Cenário II, Estudo de Caso II.

Nível	Equipamentos	Dependências						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1
5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

@US	@US
@REVJ	@REVJ
@REVM	@REVM
@TR	@TR
@UG1	@UG1
@UG2	@UG2
@RTR	@RTR
@UG1-GER	@UG1-GER
@UG1-TUR	@UG1-TUR
@UG2-GER	@UG2-GER
@UG2-TUR	@UG2-TUR
@RTR-L1	@RTR-L1
@RTR-L2	@RTR-L2
@UG1-SAI	@UG1-SAI
@UG1-SRV	@UG1-SRV
@UG2-SAI	@UG2-SAI
@UG2-SRV	@UG2-SRV
@RTR-LA1	@RTR-LA1
@RTR-LA2	@RTR-LA2
@RTR-LO1	@RTR-LO1
@RTR-LO2	@RTR-LO2
@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-L1
@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-L2
@UG1-SRV-L1	@UG1-SRV-L1
@UG1-SRV-L2	@UG1-SRV-L2
@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-L1
@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-L2
@UG2-SRV-L1	@UG2-SRV-L1
@UG2-SRV-L2	@UG2-SRV-L2
@RTR-BA1	@RTR-BA1
@RTR-BA2	@RTR-BA2
@RTR-BO1	@RTR-BO1
@RTR-BO2	@RTR-BO2
@UG1-SAI-VA1	@UG1-SAI-VA1
@UG1-SAI-VA2	@UG1-SAI-VA2
@UG1-SRV-BO1	@UG1-SRV-BO1
@UG1-SRV-BO2	@UG1-SRV-BO2
@UG1-SRV-HID1	@UG1-SRV-HID1
@UG1-SRV-HID2	@UG1-SRV-HID2
@UG2-SAI-VA1	@UG2-SAI-VA1
@UG2-SAI-VA2	@UG2-SAI-VA2
@UG2-SRV-BO1	@UG2-SRV-BO1
@UG2-SRV-BO2	@UG2-SRV-BO2
@UG2-SRV-HID1	@UG2-SRV-HID1
@UG2-SRV-HID2	@UG2-SRV-HID2
@UG1-SRV-CMP1	@UG1-SRV-CMP1
@UG1-SRV-CMP2	@UG1-SRV-CMP2
@UG2-SRV-CMP1	@UG2-SRV-CMP1
@UG2-SRV-CMP2	@UG2-SRV-CMP2

(a)

(b)

Figura 52 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário II, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Tabela 26 – Matriz de Dependências resultante do Cenário III, Estudo de Caso II.

Nível	Equipamentos	Dependências						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1
5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

@US	@US
@REVJ	@REVJ
@REVM	@REVM
@TR	@TR
@UG1	@UG1
@UG2	@UG2
@RTR	@RTR
@UG1-GER	@UG1-GER
@UG1-TUR	@UG1-TUR
@UG2-GER	@UG2-GER
@UG2-TUR	@UG2-TUR
@RTR-L1	@RTR-L1
@RTR-L2	@RTR-L2
@UG1-SAI	@UG1-SAI
@UG1-SRV	@UG1-SRV
@UG2-SAI	@UG2-SAI
@UG2-SRV	@UG2-SRV
@RTR-LA1	@RTR-LA1
@RTR-LA2	@RTR-LA2
@RTR-LO1	@RTR-LO1
@RTR-LO2	@RTR-LO2
@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-L1
@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-L2
@UG1-SRV-L1	@UG1-SRV-L1
@UG1-SRV-L2	@UG1-SRV-L2
@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-L1
@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-L2
@UG2-SRV-L1	@UG2-SRV-L1
@UG2-SRV-L2	@UG2-SRV-L2
@RTR-BA1	@RTR-BA1
@RTR-BA2	@RTR-BA2
@RTR-BO1	@RTR-BO1
@RTR-BO2	@RTR-BO2
@UG1-SAI-VA1	@UG1-SAI-VA1
@UG1-SAI-VA2	@UG1-SAI-VA2
@UG1-SRV-BO1	@UG1-SRV-BO1
@UG1-SRV-BO2	@UG1-SRV-BO2
@UG1-SRV-HID1	@UG1-SRV-HID1
@UG1-SRV-HID2	@UG1-SRV-HID2
@UG2-SAI-VA1	@UG2-SAI-VA1
@UG2-SAI-VA2	@UG2-SAI-VA2
@UG2-SRV-BO1	@UG2-SRV-BO1
@UG2-SRV-BO2	@UG2-SRV-BO2
@UG2-SRV-HID1	@UG2-SRV-HID1
@UG2-SRV-HID2	@UG2-SRV-HID2
@UG1-SRV-CMP1	@UG1-SRV-CMP1
@UG1-SRV-CMP2	@UG1-SRV-CMP2
@UG2-SRV-CMP1	@UG2-SRV-CMP1
@UG2-SRV-CMP2	@UG2-SRV-CMP2

(a)

(b)

Figura 53 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário III, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Tabela 27 – Matriz de Dependências resultante do Cenário IV, Estudo de Caso II.

Nível	Equipamentos	Dependências						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1
5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

@US	@US
@REVJ	@REVJ
@REVM	@REVM
@TR	@TR
@UG1	@UG1
@UG2	@UG2
@RTR	@RTR
@UG1-GER	@UG1-GER
@UG1-TUR	@UG1-TUR
@UG2-GER	@UG2-GER
@UG2-TUR	@UG2-TUR
@RTR-L1	@RTR-L1
@RTR-L2	@RTR-L2
@UG1-SAI	@UG1-SAI
@UG1-SRV	@UG1-SRV
@UG2-SAI	@UG2-SAI
@UG2-SRV	@UG2-SRV
@RTR-LA1	@RTR-LA1
@RTR-LA2	@RTR-LA2
@RTR-LO1	@RTR-LO1
@RTR-LO2	@RTR-LO2
@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-L1
@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-L2
@UG1-SRV-L1	@UG1-SRV-L1
@UG1-SRV-L2	@UG1-SRV-L2
@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-L1
@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-L2
@UG2-SRV-L1	@UG2-SRV-L1
@UG2-SRV-L2	@UG2-SRV-L2
@RTR-BA1	@RTR-BA1
@RTR-BA2	@RTR-BA2
@RTR-BO1	@RTR-BO1
@RTR-BO2	@RTR-BO2
@UG1-SAI-VA1	@UG1-SAI-VA1
@UG1-SAI-VA2	@UG1-SAI-VA2
@UG1-SRV-BO1	@UG1-SRV-BO1
@UG1-SRV-BO2	@UG1-SRV-BO2
@UG1-SRV-HID1	@UG1-SRV-HID1
@UG1-SRV-HID2	@UG1-SRV-HID2
@UG2-SAI-VA1	@UG2-SAI-VA1
@UG2-SAI-VA2	@UG2-SAI-VA2
@UG2-SRV-BO1	@UG2-SRV-BO1
@UG2-SRV-BO2	@UG2-SRV-BO2
@UG2-SRV-HID1	@UG2-SRV-HID1
@UG2-SRV-HID2	@UG2-SRV-HID2
@UG1-SRV-CMP1	@UG1-SRV-CMP1
@UG1-SRV-CMP2	@UG1-SRV-CMP2
@UG2-SRV-CMP1	@UG2-SRV-CMP1
@UG2-SRV-CMP2	@UG2-SRV-CMP2

(a)

(b)

Figura 54 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário IV, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Tabela 28 – Matriz de Dependências resultante do Cenário V, Estudo de Caso II.

Nível	Equipamentos	Dependências						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1
5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

@US	@US
@REVJ	@REVJ
@REVM	@REVM
@TR	@TR
@UG1	@UG1
@UG2	@UG2
@RTR	@RTR
@UG1-GER	@UG1-GER
@UG1-TUR	@UG1-TUR
@UG2-GER	@UG2-GER
@UG2-TUR	@UG2-TUR
@RTR-L1	@RTR-L1
@RTR-L2	@RTR-L2
@UG1-SAI	@UG1-SAI
@UG1-SRV	@UG1-SRV
@UG2-SAI	@UG2-SAI
@UG2-SRV	@UG2-SRV
@RTR-LA1	@RTR-LA1
@RTR-LA2	@RTR-LA2
@RTR-LO1	@RTR-LO1
@RTR-LO2	@RTR-LO2
@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-L1
@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-L2
@UG1-SRV-L1	@UG1-SRV-L1
@UG1-SRV-L2	@UG1-SRV-L2
@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-L1
@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-L2
@UG2-SRV-L1	@UG2-SRV-L1
@UG2-SRV-L2	@UG2-SRV-L2
@RTR-BA1	@RTR-BA1
@RTR-BA2	@RTR-BA2
@RTR-BO1	@RTR-BO1
@RTR-BO2	@RTR-BO2
@UG1-SAI-VA1	@UG1-SAI-VA1
@UG1-SAI-VA2	@UG1-SAI-VA2
@UG1-SRV-BO1	@UG1-SRV-BO1
@UG1-SRV-BO2	@UG1-SRV-BO2
@UG1-SRV-HID1	@UG1-SRV-HID1
@UG1-SRV-HID2	@UG1-SRV-HID2
@UG2-SAI-VA1	@UG2-SAI-VA1
@UG2-SAI-VA2	@UG2-SAI-VA2
@UG2-SRV-BO1	@UG2-SRV-BO1
@UG2-SRV-BO2	@UG2-SRV-BO2
@UG2-SRV-HID1	@UG2-SRV-HID1
@UG2-SRV-HID2	@UG2-SRV-HID2
@UG1-SRV-CMP1	@UG1-SRV-CMP1
@UG1-SRV-CMP2	@UG1-SRV-CMP2
@UG2-SRV-CMP1	@UG2-SRV-CMP1
@UG2-SRV-CMP2	@UG2-SRV-CMP2

(a)

(b)

Figura 55 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário V, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

Tabela 29 – Matriz de Dependências resultante do Cenário VI, Estudo de Caso II.

Nível	Equipamentos	Dependências						
1	@US	R1:@UG1	R2:@UG2	@REVM	@REVJ	@TR		
2	@REVJ	N1J	N2J					
2	@REVM	N1M	N2M					
2	@TR	TR	@RTR					
2	@UG1	UG1-CM	@UG1-TUR	@UG1-GER	UG1-CJ			
2	@UG2	UG2-CM	@UG2-TUR	@UG2-GER	UG2-CJ			
3	@RTR	RTR-TQA	R1:@RTR-L1	R2:@RTR-L2				
3	@UG1-GER	UG1-GER	@UG1-SAI					
3	@UG1-TUR	UG1-TUR	@UG1-SRV					
3	@UG2-GER	UG2-GER	@UG2-SAI					
3	@UG2-TUR	UG2-TUR	@UG2-SRV					
4	@RTR-L1	@RTR-LA1	@RTR-LO1	RTR-IT1				
4	@RTR-L2	@RTR-LA2	@RTR-LO2	RTR-IT2				
4	@UG1-SAI	UG1-SAI-CMP	UG1-SAI-VP	UG1-SAI-DSP	R1:@UG1-SAI-L1	R2:@UG1-SAI-L2		
4	@UG1-SRV	UG1-SRV-TQO	R1:@UG1-SRV-L1	R2:@UG1-SRV-L2				
4	@UG2-SAI	UG2-SAI-CMP	UG2-SAI-VP	UG2-SAI-DSP	R1:@UG2-SAI-L1	R2:@UG2-SAI-L2		
4	@UG2-SRV	UG2-SRV-TQO	R1:@UG2-SRV-L1	R2:@UG2-SRV-L2				
5	@RTR-LA1	RTR-VMA1	@RTR-BA1	RTR-VNA1				
5	@RTR-LA2	RTR-VMA2	@RTR-BA2	RTR-VNA2				
5	@RTR-LO1	RTR-VMO1	@RTR-BO1	RTR-VNO1				
5	@RTR-LO2	RTR-VMO2	@RTR-BO2	RTR-VNO2				
5	@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VN1					
5	@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VN2					
5	@UG1-SRV-L1	UG1-SRV-VD1	UG1-SRV-SV1	UG1-SRV-VC1	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VNO1	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-VCO1
5	@UG1-SRV-L2	UG1-SRV-VD2	UG1-SRV-SV2	UG1-SRV-VC2	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VNO2	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-VCO2
5	@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VN1					
5	@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VN2					
5	@UG2-SRV-L1	UG2-SRV-VD1	UG2-SRV-SV1	UG2-SRV-VC1	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VNO1	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-VCO1
5	@UG2-SRV-L2	UG2-SRV-VD2	UG2-SRV-SV2	UG2-SRV-VC2	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VNO2	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-VCO2
6	@RTR-BA1	RTR-BA1	RTR-BA1-AE	RTR-BA1-LB				
6	@RTR-BA2	RTR-BA2	RTR-BA2-AE	RTR-BA2-LB				
6	@RTR-BO1	RTR-BO1	RTR-BO1-AE	RTR-BO1-LB				
6	@RTR-BO2	RTR-BO2	RTR-BO2-AE	RTR-BO2-LB				
6	@UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VA1	UG1-SAI-VS1	UG1-SAI-TA1				
6	@UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VA2	UG1-SAI-VS2	UG1-SAI-TA2				
6	@UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1	UG1-SRV-BO1-AE	UG1-SRV-BO1-LB	UG1-SRV-BO1-SC			
6	@UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2	UG1-SRV-BO2-AE	UG1-SRV-BO2-LB	UG1-SRV-BO2-SC			
6	@UG1-SRV-HID1	UG1-SRV-VP1	UG1-SRV-VN1	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-VLV1			
6	@UG1-SRV-HID2	UG1-SRV-VP2	UG1-SRV-VN2	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-VLV2			
6	@UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VA1	UG2-SAI-VS1	UG2-SAI-TA1				
6	@UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VA2	UG2-SAI-VS2	UG2-SAI-TA2				
6	@UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1	UG2-SRV-BO1-AE	UG2-SRV-BO1-LB	UG2-SRV-BO1-SC			
6	@UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2	UG2-SRV-BO2-AE	UG2-SRV-BO2-LB	UG2-SRV-BO2-SC			
6	@UG2-SRV-HID1	UG2-SRV-VP1	UG2-SRV-VN1	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-VLV1			
6	@UG2-SRV-HID2	UG2-SRV-VP2	UG2-SRV-VN2	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-VLV2			
7	@UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1	UG1-SRV-CMP1-AE	UG1-SRV-CMP1-LB	UG1-SRV-CMP1-SC			
7	@UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2	UG1-SRV-CMP2-AE	UG1-SRV-CMP2-LB	UG1-SRV-CMP2-SC			
7	@UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1	UG2-SRV-CMP1-AE	UG2-SRV-CMP1-LB	UG2-SRV-CMP1-SC			
7	@UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2	UG2-SRV-CMP2-AE	UG2-SRV-CMP2-LB	UG2-SRV-CMP2-SC			

@US	@US
@REVJ	@REVJ
@REVM	@REVM
@TR	@TR
@UG1	@UG1
@UG2	@UG2
@RTR	@RTR
@UG1-GER	@UG1-GER
@UG1-TUR	@UG1-TUR
@UG2-GER	@UG2-GER
@UG2-TUR	@UG2-TUR
@RTR-L1	@RTR-L1
@RTR-L2	@RTR-L2
@UG1-SAI	@UG1-SAI
@UG1-SRV	@UG1-SRV
@UG2-SAI	@UG2-SAI
@UG2-SRV	@UG2-SRV
@RTR-LA1	@RTR-LA1
@RTR-LA2	@RTR-LA2
@RTR-LO1	@RTR-LO1
@RTR-LO2	@RTR-LO2
@UG1-SAI-L1	@UG1-SAI-L1
@UG1-SAI-L2	@UG1-SAI-L2
@UG1-SRV-L1	@UG1-SRV-L1
@UG1-SRV-L2	@UG1-SRV-L2
@UG2-SAI-L1	@UG2-SAI-L1
@UG2-SAI-L2	@UG2-SAI-L2
@UG2-SRV-L1	@UG2-SRV-L1
@UG2-SRV-L2	@UG2-SRV-L2
@RTR-BA1	@RTR-BA1
@RTR-BA2	@RTR-BA2
@RTR-BO1	@RTR-BO1
@RTR-BO2	@RTR-BO2
@UG1-SAI-VA1	@UG1-SAI-VA1
@UG1-SAI-VA2	@UG1-SAI-VA2
@UG1-SRV-BO1	@UG1-SRV-BO1
@UG1-SRV-BO2	@UG1-SRV-BO2
@UG1-SRV-HID1	@UG1-SRV-HID1
@UG1-SRV-HID2	@UG1-SRV-HID2
@UG2-SAI-VA1	@UG2-SAI-VA1
@UG2-SAI-VA2	@UG2-SAI-VA2
@UG2-SRV-BO1	@UG2-SRV-BO1
@UG2-SRV-BO2	@UG2-SRV-BO2
@UG2-SRV-HID1	@UG2-SRV-HID1
@UG2-SRV-HID2	@UG2-SRV-HID2
@UG1-SRV-CMP1	@UG1-SRV-CMP1
@UG1-SRV-CMP2	@UG1-SRV-CMP2
@UG2-SRV-CMP1	@UG2-SRV-CMP1
@UG2-SRV-CMP2	@UG2-SRV-CMP2

(a)

(b)

Figura 56 – Estado da MD após aplicação do algoritmo de varredura para o Cenário VI, Estudo de Caso II: (a) após varredura direta, (b) após varredura indireta.

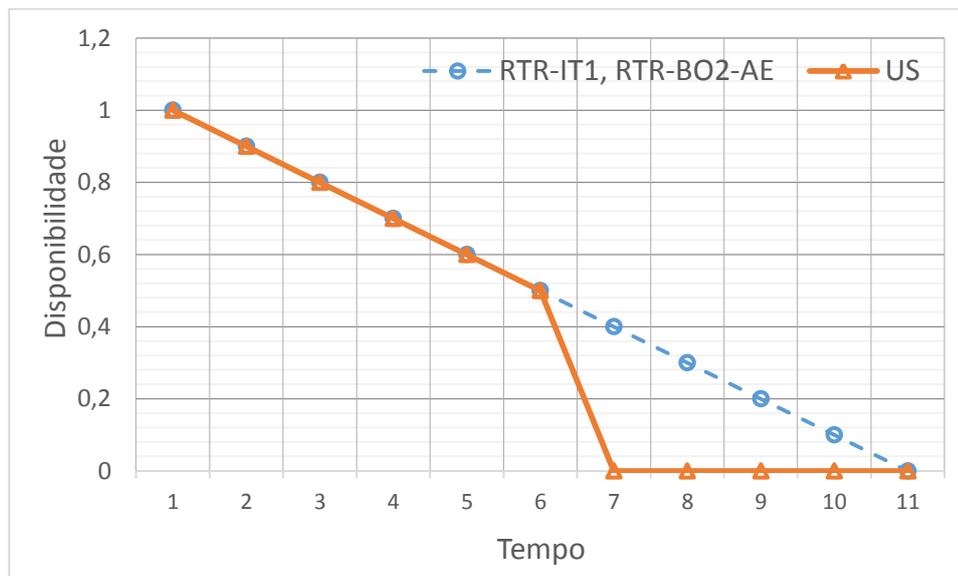


Figura 57 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário I (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

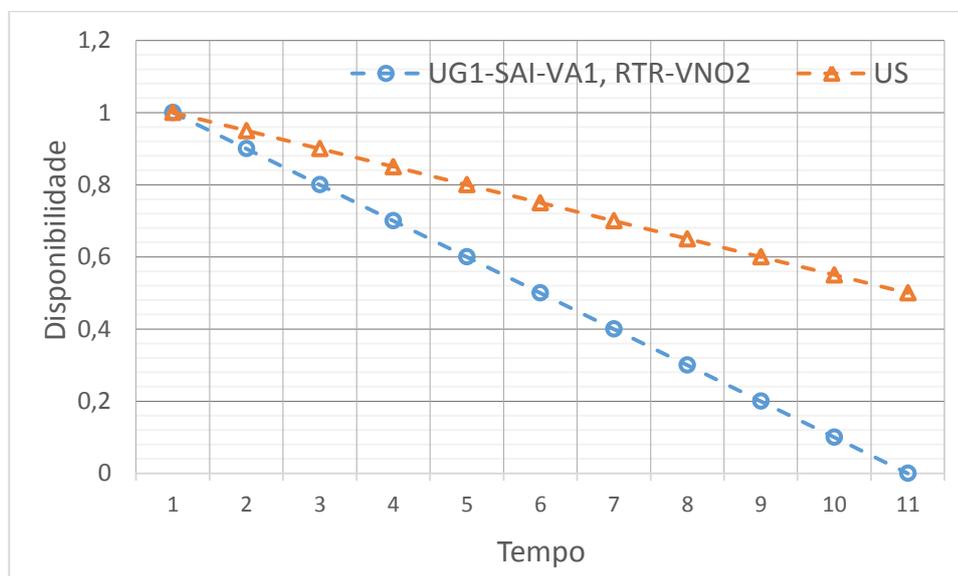


Figura 58 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário II (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

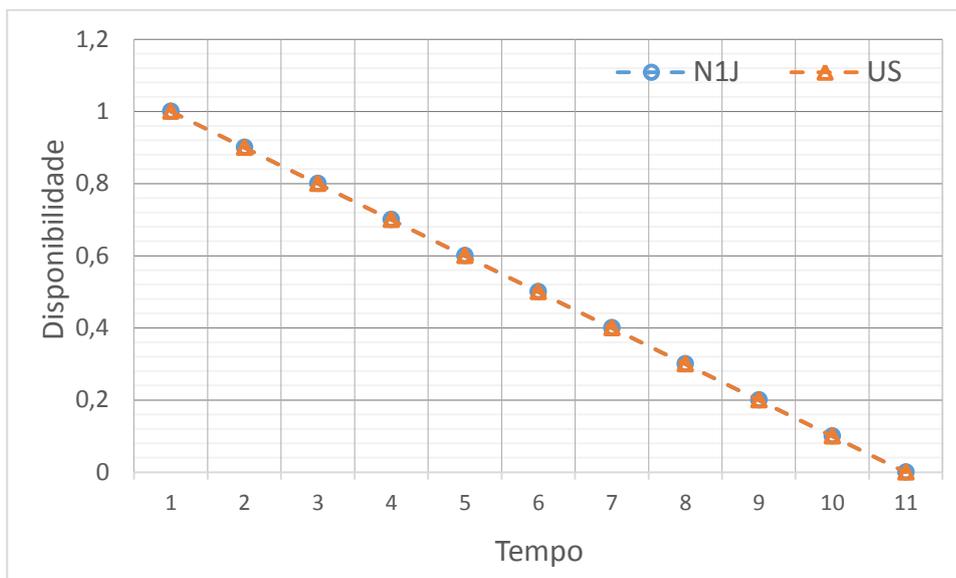


Figura 59 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário III (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

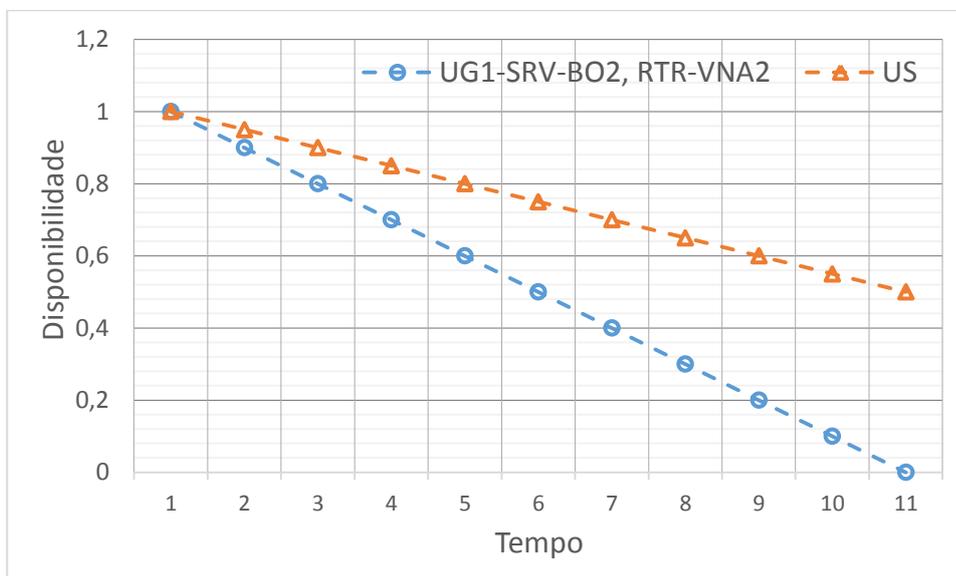


Figura 60 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário IV (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

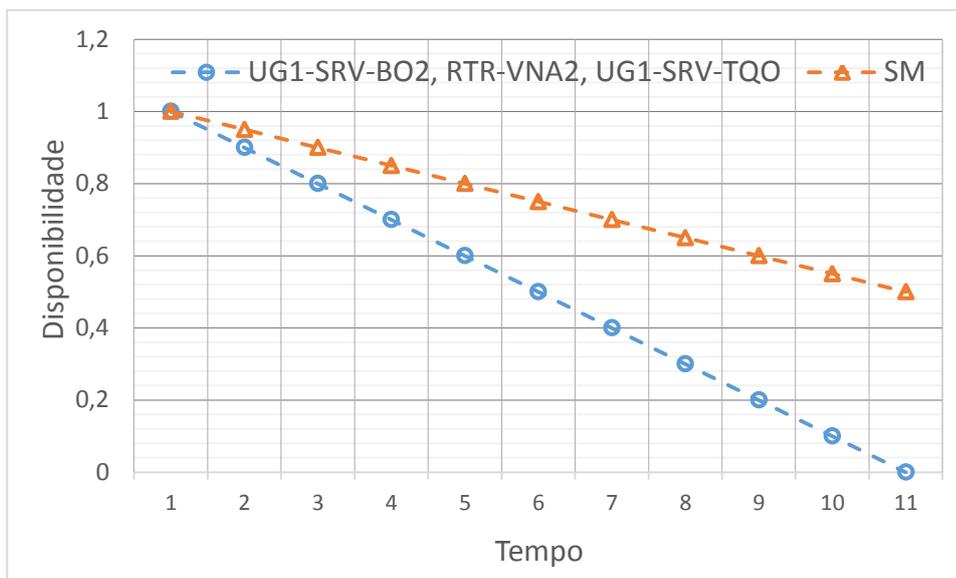


Figura 61 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário V (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.

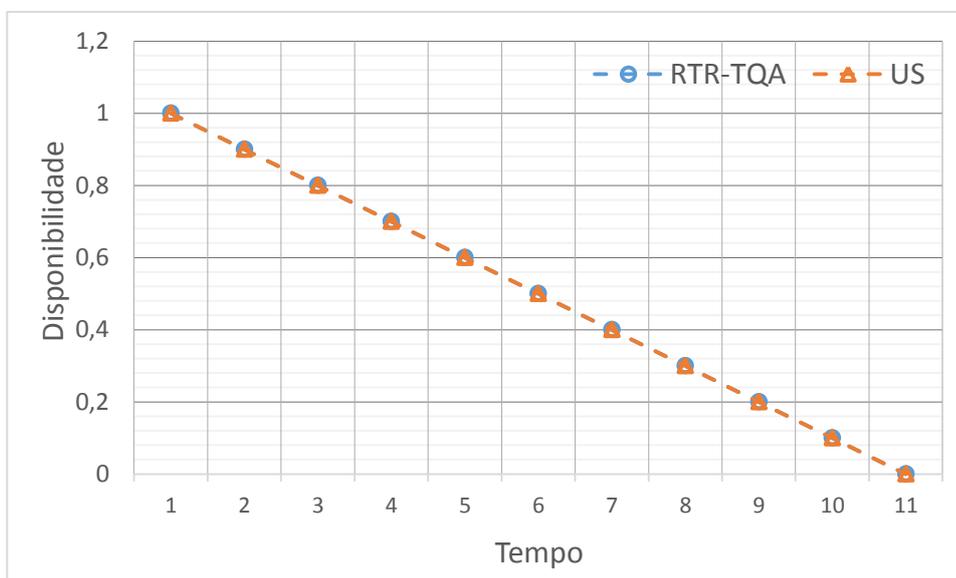


Figura 62 – Análise de sensibilidade do impacto do deterioro dos componentes envolvidos no Cenário VI (Estudo de Caso II) sobre a disponibilidade do sistema, considerando os restantes componentes totalmente disponíveis.