

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DA DISPONIBILIDADE DE  
SISTEMAS DE SEGURANÇA EMPREGANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Vinícius Correa Damaso

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

---

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

---

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

---

Prof. Antônio José da Silva Neto, Ph.D.

---

Prof. Marcio Nele de Souza, D.Sc.

---

Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2006

DAMASO, VINÍCIUS CORREA

Um Modelo de Otimização Integrada da  
Disponibilidade de Sistemas de Segurança  
Empregando Algoritmos Genéticos [Rio de  
Janeiro] 2006

XVIII, 106 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
D.Sc., Engenharia Nuclear, 2006)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Disponibilidade
2. Sistemas de Segurança
3. Otimização Integrada
4. Algoritmos Genéticos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha mulher, Mônica,  
e aos meus filhos, Carlos Alberto e Isabela.

“O homem razoável se adapta ao mundo;  
o irascível tenta adaptar o mundo a si  
próprio. Assim, o progresso depende do  
homem irascível.”

George Bernard Shaw

## Agradecimentos

A Deus, pela saúde física e mental necessárias a realização desse trabalho.

A meus pais, Carlos Alberto e Erondina, e a meu irmão, Márcio, pelo apoio em todas as realizações da minha vida.

À minha mulher, Mônica, pelo incentivo, compreensão e apoio, sempre.

A meus filhos, Carlos Alberto e Isabela, por não terem perturbado o suficiente para inviabilizar a realização desse trabalho.

Ao Centro Tecnológico do Exército, pela oportunidade de realizar o Curso de Doutorado, e em particular ao Major Carlos Eduardo da Mota Góes e ao Major Sérgio Eduardo Martins de Oliveira, pelo inestimável apoio ao longo da realização do curso.

Aos meus orientadores, Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo e Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, pelo apoio na condução dos trabalhos.

Ao Dr. Tenente-Coronel Robson Pinheiro Lins, pelo incentivo, pelo apoio e pela sempre preciosa ajuda durante a realização do Curso de Doutorado.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Nuclear, Tânia, Josevalda e Reginaldo, pela colaboração e pelo suporte administrativo.

À Eletrobrás Termonuclear S.A., especificamente ao Dr. José Manuel Diaz Francisco, pelo estabelecimento do convênio que permitiu o acesso aos dados necessários para a aplicação prática realizada nesta tese.

Ao Eng<sup>o</sup> Sidnei Barbosa Siqueira, em especial, pela fundamental colaboração para a realização da aplicação prática desta tese, e com quem compartilho os méritos por essa etapa do trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> Marcio Rezende Siniscalchi, pelo apoio no trabalho de aplicação prática, e a todos os funcionários da Eletrobrás Termonuclear S.A. que contribuíram com esse trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> Vaner Diniz, pela ajuda na elaboração das propostas para o exame de qualificação.

Aos amigos Flavia Vieira, Laís Aguiar, Mauricio Sant'Ana, Pauli Garcia e Vanessa Garcia, por toda ajuda e principalmente pelo agradável convívio.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DA DISPONIBILIDADE DE SISTEMAS DE SEGURANÇA EMPREGANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Vinícius Correa Damaso

Dezembro/2006

Orientadores: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo  
Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho desenvolve um modelo matemático de cálculo de disponibilidade para ser aplicado na otimização integrada da performance de sistemas. O processo de otimização trata, de forma simultânea e integrada, projeto, confiabilidade, alocação de redundância, planejamento de manutenções/testes e custos. Em uma primeira etapa, o método foi avaliado por meio de sua aplicação a um sistema hipotético. Posteriormente, realizou-se uma aplicação prática na otimização da disponibilidade do Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle da Usina Nuclear de Angra I. Algoritmos genéticos foram utilizados como ferramenta de busca de soluções. Os resultados mostram as vantagens da otimização integrada, confirmando a aplicabilidade da metodologia e sua validação como instrumento de otimização e análise de desempenho de sistemas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UF RJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A MODEL OF INTEGRATED OPTIMIZATION OF THE SAFETY SYSTEMS  
AVAILABILITY USING GENETIC ALGORITHMS

Vinícius Correa Damaso

December/2006

Advisors: Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo  
Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Department: Nuclear Engineering

This work develops a mathematical model of availability calculation to be applied in the integrated optimization of systems performance. The optimization process treats, in a simultaneous and integrated way, design, reliability, redundancy allocation, maintenances/tests scheduling and costs. In a first step, the method was evaluated through its application to a simplified hypothetical system. After that, a practical application was accomplished through the availability optimization of the Control Room Air-Conditioning System of the Angra I Nuclear Power Plant. Genetic algorithms were used as the solutions search tool. The results show the advantages of the integrated optimization, verifying the methodology applicability and its validation as an instrument of systems optimization and performance analysis.

# Índice

<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	1
1.1. Considerações Iniciais .....	1
1.2. Confiabilidade de Sistemas .....	2
1.3. Revisão Bibliográfica .....	4
1.4. Motivação .....	7
1.5. Objetivos.....	8
1.6. Organização do Trabalho.....	8
<b>Capítulo 2 – Modelagem para Otimização Integrada de Sistemas</b> .....	10
2.1. Introdução .....	10
2.2. Disponibilidade de Componentes .....	11
2.2.1. Componente ativo.....	11
2.2.2. Componente reserva .....	17
2.3. Manutenções Preventivas e Testes .....	20
2.3.1. Distribuição proporcional .....	21
2.3.2. Distribuição exponencial .....	22
2.3.3. Valor limite de disponibilidade .....	23
2.4. Custos	
2.4.1. Custos de componente .....	23
2.4.2. Custos de sistema .....	24
2.5. Função de Avaliação .....	24
2.6. Algoritmo Genético .....	25
<b>Capítulo 3 – Aplicação da Modelagem a um Sistema Hipotético</b> .....	28
3.1. Descrição do Sistema Hipotético.....	28
3.2. Disponibilidade.....	31
3.2.1. Disponibilidade do componente ativo .....	31
3.2.2. Disponibilidade do componente redundante .....	31
3.2.3. Disponibilidade do subsistema .....	32
3.2.4. Disponibilidade do sistema.....	32
3.3. Custos .....	33
3.3.1. Custos de um componente ativo.....	33



3.3.2. Custos de um componente redundante .....	34
3.4. Objetivo da Otimização .....	34
3.5. Algoritmo Genético .....	35
<b>Capítulo 4 – Otimização Integrada do Sistema Hipotético .....</b>	<b>37</b>
4.1. Introdução .....	37
4.2. Dados de Entrada.....	37
4.3. Resultados Obtidos .....	40
4.4. Avaliação dos Resultados .....	46
4.5. Otimização <i>a priori</i> versus Otimização <i>a posteriori</i> .....	47
4.6. Considerações sobre Apoio à Decisão .....	49
<b>Capítulo 5 – Aplicação da Modelagem ao Sistema ASC de Angra I .....</b>	<b>50</b>
5.1. Introdução .....	50
5.2. Descrição do Sistema ASC de Angra I.....	51
5.3. Proposta de Otimização do Sistema ASC de Angra I .....	53
5.4. Disponibilidade.....	56
5.4.1. Disponibilidade do subsistema de refrigeração .....	56
5.4.2. Disponibilidade do subsistema de água gelada .....	57
5.4.3. Disponibilidade do subsistema de filtragem.....	57
5.4.4. Disponibilidade do subsistema de ventiladores.....	58
5.4.5. Disponibilidade do Sistema ASC .....	58
5.5. Custos .....	59
5.5.1. Custos dos componentes.....	59
5.5.2. Lucro cessante .....	59
5.5.3. Custo do sistema.....	62
5.6. Objetivo da Otimização .....	63
5.7. Algoritmo Genético .....	64
<b>Capítulo 6 – Otimização Integrada do Sistema ASC de Angra I.....</b>	<b>66</b>
6.1. Introdução .....	66
6.2. Dados de Entrada.....	66
6.2.1. Informações gerais.....	66
6.2.2. Subsistema de água gelada .....	68
6.2.3. Subsistema de refrigeração.....	68
6.2.4. Subsistema de filtragem .....	69

6.2.5. Subsistema de ventiladores.....	69
6.3. Resultados da Otimização .....	69
6.4. Análise dos Resultados .....	78
6.5. Considerações sobre Apoio à Decisão .....	80
<b>Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações .....</b>	<b>81</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>84</b>
<b>Apêndice A – Conjunto de Soluções para o Sistema Hipotético .....</b>	<b>91</b>
<b>Apêndice B – Soluções Não Dominadas do Sistema Hipotético .....</b>	<b>95</b>
<b>Apêndice C – Conjunto de Soluções para o Sistema ASC.....</b>	<b>99</b>
<b>Apêndice D – Soluções Não Dominadas do Sistema ASC.....</b>	<b>103</b>
<b>Apêndice E – Planejamento de Intervenções para o Sistema ASC.....</b>	<b>105</b>

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Representação esquemática do genótipo para o AG .....	27
Figura 3.1. Configuração básica do sistema hipotético .....	28
Figura 3.2. Segunda configuração do sistema hipotético.....	28
Figura 3.3. Terceira configuração do sistema hipotético .....	29
Figura 3.4. Configuração global do sistema hipotético .....	29
Figura 3.5. Configuração global do sistema hipotético com previsão de redundâncias .....	30
Figura 3.6. Representação esquemática do genótipo para o sistema hipotético .....	36
Figura 4.1. Configuração final do sistema hipotético de acordo com a melhor solução.....	40
Figura 4.2. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema A.....	42
Figura 4.3. Disponibilidade versus tempo do componente reserva do subsistema A.....	42
Figura 4.4. Disponibilidade versus tempo do subsistema A.....	43
Figura 4.5. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema B .....	43
Figura 4.6. Disponibilidade versus tempo do componente reserva do subsistema B .....	43
Figura 4.7. Disponibilidade versus tempo do subsistema B .....	44
Figura 4.8. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema C.....	44
Figura 4.9. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema D.....	45
Figura 4.10. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema E .....	45
Figura 4.11. Comportamento da disponibilidade em função do tempo para o sistema hipotético .....	45
Figura 5.1. Esquema simplificado do Sistema ASC de Angra I.....	52

Figura 5.2. Esquema simplificado da estrutura proposta para Sistema ASC .....	55
Figura 5.3. Representação esquemática do genótipo para o Sistema ASC .....	65
Figura 6.1. Curva de disponibilidade para o tramo 1 do subsistema de água gelada .....	70
Figura 6.2. Curva de disponibilidade para o tramo 2 do subsistema de água gelada .....	71
Figura 6.3. Curva de disponibilidade para o tramo 3 do subsistema de água gelada .....	71
Figura 6.4. Curva de disponibilidade do subsistema de água gelada.....	71
Figura 6.5. Curva de disponibilidade para o tramo 1 do subsistema de refrigeração .....	72
Figura 6.6. Curva de disponibilidade para o tramo 2 do subsistema de refrigeração .....	72
Figura 6.7. Curva de disponibilidade do subsistema de refrigeração .....	73
Figura 6.8. Curva de disponibilidade para a unidade de filtração 1 .....	73
Figura 6.9. Curva de disponibilidade para a unidade de filtração 2 .....	74
Figura 6.10. Curva de disponibilidade do subsistema de filtração.....	74
Figura 6.11. Curva de disponibilidade para o ventilador 1 do subsistema de ventiladores.....	75
Figura 6.12. Curva de disponibilidade para o ventilador 2 do subsistema de ventiladores.....	75
Figura 6.13. Curva de disponibilidade do subsistema de ventiladores .....	75
Figura 6.14. Curva de disponibilidade do Sistema ASC.....	76
Figura 6.15. Esquema simplificado da estrutura otimizada do Sistema ASC .....	77
Figura A.1. Relação entre o par de objetivos $A_{SIS}^*(T_f) \times F_{obj}$ .....	93
Figura A.2. Relação entre o par de objetivos $C_{T,SIS}^{-1} \times F_{obj}$ .....	93
Figura A.3. Relação entre o par de objetivos $C_{A,SIS}^{-1} \times F_{obj}$ .....	94
Figura C.1. Conjunto de soluções obtidas pelo AG para o Sistema ASC .....	100

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1. Dados característicos dos componentes em regime de operação. Unidade dos valores: $[\theta] \equiv \text{ano}$ , $[v] \equiv \text{ano}^{-1}$ , $m$ e $\alpha$ adimensionais .....	38
Tabela 4.2. Dados característicos dos componentes em regime de reserva. Unidade dos valores: $[\theta] \equiv \text{ano}$ , $[v] \equiv \text{ano}^{-1}$ , $m$ e $\alpha$ adimensionais .....	38
Tabela 4.3. Custos relativos aos componentes .....	39
Tabela 4.4. Expectativa de rendimentos gerados pela operação dos sistemas.....	39
Tabela 4.5. Valores das grandezas para a solução de máximo valor de $F_{obj}$ .....	40
Tabela 4.6. Componentes selecionados para a configuração do sistema .....	40
Tabela 4.7. Parâmetros relacionados a intervenções para os componentes selecionados para compor o sistema.....	41
Tabela 4.8. Planejamento de manutenções preventivas, em meses, para os componentes ativos .....	41
Tabela 4.9. Planejamento de testes, em meses, para os componentes reservas .....	42
Tabela 4.10. Análise prévia das opções de configuração do sistema.....	47
Tabela 4.11. Melhores resultados dos processos de otimização .....	48
Tabela 4.12. Comparação de resultados dos processos de otimização.....	48
Tabela 6.1. Dados característicos dos tramos e componentes do Sistema ASC.....	67
Tabela 6.2. Custos relativos aos componentes e tramos do Sistema ASC.....	67
Tabela 6.3. Resultados da solução de melhor aptidão para o Sistema ASC.....	70
Tabela 6.4. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de água gelada.....	70

Tabela 6.5. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de refrigeração.....	72
Tabela 6.6. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de filtragem .....	73
Tabela 6.7. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de ventiladores .....	74
Tabela 6.8. Disponibilidades médias de acordo com a solução de melhor aptidão .....	76
Tabela A.1. Parâmetros do AG comuns a todas as configurações .....	91
Tabela A.2. Configurações utilizadas do AG.....	92
Tabela B.1. Soluções não dominadas obtidas na otimização integrada do sistema hipotético .....	95
Tabela C.1. Parâmetros do AG para otimização do Sistema ASC.....	99
Tabela D.1. Soluções não dominadas obtidas na otimização integrada do Sistema ASC.....	103
Tabela E.1. Planejamento de Intervenções para o Sistema ASC.....	105

## Lista de Símbolos

$A(t)$	disponibilidade
$\tilde{A}(t)$	indisponibilidade
$A^*(t)$	disponibilidade média durante o intervalo $t$
$\tilde{A}^*(t)$	indisponibilidade média durante o intervalo $t$
$A_{ASC}(t)$	disponibilidade do Sistema ASC
$A_{ASC}^*(t)$	disponibilidade média do Sistema ASC durante o intervalo $t$
$A_{at}(t)$	disponibilidade do componente ativo
$A_{at}^*(t)$	disponibilidade média do componente ativo durante o intervalo $t$
$A_E^*(t)$	disponibilidade média do subsistema $E$ durante intervalo $t$
$A_i(t)$	disponibilidade após a $i$ -ésima intervenção
$A_{o,i}(t_0)$	disponibilidade relacionada ao período de operação após a $i$ -ésima intervenção
$A_o^*(t)$	disponibilidade média do componente ativo durante o intervalo $t$
$A_{red}(t)$	disponibilidade do componente redundante
$A_{red}^*(t)$	disponibilidade média do componente redundante durante o intervalo $t$
$A_{SIS}(t)$	disponibilidade do sistema
$A_{SIS}^*(t)$	disponibilidade média do sistema durante o intervalo $t$
$A_{SS}(t)$	disponibilidade do subsistema
$A_{SSA}(t)$	disponibilidade do subsistema de água gelada
$\tilde{A}_{SSA}^*(t)$	indisponibilidade média do subsistema de água gelada durante o intervalo $t$
$A_{SSF}(t)$	disponibilidade do subsistema de filtragem
$A_{SSR}(t)$	disponibilidade do subsistema de refrigeração
$\tilde{A}_{SSR}^*(t)$	indisponibilidade média do subsistema de refrigeração durante o intervalo $t$
$A_{SSV}(t)$	disponibilidade do subsistema de ventilação
$A_{T,i}(t)$	disponibilidade do tramo “ $i$ ”
$A_{UF,i}(t)$	disponibilidade de unidade de filtragem após a $i$ -ésima intervenção
$A_{VR}(t)$	disponibilidade de ventilador reforçador

$A_{“X”}$	disponibilidade do subsistema “X”
$C_{A,SIS}$	custos de aquisição do sistema
$C_{aq}$	custo de aquisição
$C_{DESL}$	custo com desligamento da usina devido à indisponibilidade do Sistema ASC
$C_{mc}$	custo de manutenção corretiva
$C'_{mc}$	custo de manutenção corretiva por unidade de tempo
$C_{mp}$	custo de manutenção preventiva
$C_t$	custo de testes
$C_T$	custo total
$CT$	custos totais na otimização do Sistema ASC
$C_{T,ASC}$	custos totais do Sistema ASC
$C_{T,SIS}$	custos totais do sistema
$C_{op}$	custo operacional
$C'_{op}$	custo operacional por unidade de tempo
$DU_{,i}$	número estimado de desligamentos da usina para o caso “i”
$F_{ASC}$	função de avaliação para o Sistema ASC
$F_{obj}$	ganho obtido com a operação do sistema, considerado como função objetivo
$LC$	lucro cessante
$m$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull
$m_a$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas prematuras
$m_{a,o}$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas prematuras para regime de operação
$m_{a,r}$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas prematuras para regime de reserva
$m_b$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas randômicas
$m_{b,o}$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas randômicas para regime de operação
$m_{b,r}$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas randômicas para regime de reserva
$m_c$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas por envelhecimento



$m_{c,o}$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas por envelhecimento para regime de operação
$m_{c,r}$	parâmetro de forma de uma distribuição de Weibull associado a falhas por envelhecimento para regime de reserva
$n_{mp}$	número de manutenções preventivas planejadas
$n_t$	número de testes planejados
$P_A$	indisponibilidade após um teste
$P_{A,i}$	indisponibilidade após o $i$ -ésimo teste
$R(t)$	confiabilidade
$R_i(t)$	confiabilidade após a $i$ -ésima intervenção
$R_o(t_o)$	confiabilidade relacionada ao período de operação
$R_{o,i}(t_o)$	confiabilidade relacionada ao período de operação após a $i$ -ésima intervenção
$R_r(t_r)$	confiabilidade relacionada ao período de reserva
$R_{r,i}(t_r)$	confiabilidade relacionada ao período de reserva após a $i$ -ésima intervenção
$T_f$	tempo de operação do sistema
$T_{f,o}$	tempo de operação do sistema, relativo ao tempo equivalente em operação
$T_i$	instante em que há disponibilização após a $i$ -ésima intervenção
$T'_i$	instante do início da $i$ -ésima intervenção
$t_o$	tempo equivalente em operação
$T_{o,i}$	instante em que há disponibilização após a $i$ -ésima intervenção, relativo ao tempo equivalente em operação
$T'_{o,i}$	instante do início da $i$ -ésima intervenção, relativo ao tempo equivalente em operação
$t_r$	tempo equivalente em reserva
$T_{r,i}$	instante em que há disponibilização após a $i$ -ésima intervenção, relativo ao tempo equivalente em reserva
$T'_{r,i}$	instante do início da $i$ -ésima intervenção, relativo ao tempo equivalente em reserva
$Y'$	rendimento do sistema, por unidade de tempo, obtido quando o subsistema $E$ está indisponível

$Y'_E$	rendimento do sistema, por unidade de tempo, obtido quando o subsistema $E$ está operando
$\alpha(t)$	fator de condicionamento
$\alpha_o(t)$	fator de condicionamento relacionado ao período de operação
$\alpha_r(t)$	fator de condicionamento relacionado ao período de reserva
$\beta$	fator de distribuição
$\Delta T_i$	$i$ -ésimo intervalo de tempo entre intervenções
$\lambda(t)$	taxa de falha
$\nu(t)$	taxa de reparo
$\theta$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull
$\theta_a$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas prematuras
$\theta_{a,o}$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas prematuras para regime de operação
$\theta_{a,r}$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas prematuras para regime de reserva
$\theta_b$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas randômicas
$\theta_{b,o}$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas randômicas para regime de operação
$\theta_{b,r}$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas randômicas para regime de reserva
$\theta_c$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas por envelhecimento
$\theta_{c,o}$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas por envelhecimento para regime de operação
$\theta_{c,r}$	parâmetro de escala de uma distribuição de Weibull associado a falhas por envelhecimento para regime de reserva
$\tau_{mp}$	tempo de manutenção preventiva
$\tau_t$	tempo de teste

# Capítulo 1

## – Introdução –

### 1.1. Considerações Iniciais

A procura por soluções ótimas representa um dos maiores desafios em todos os campos de atividade produtiva envolvidos com ciência e tecnologia. Mais especificamente, os diversos setores industriais, inseridos em um ambiente marcadamente competitivo, são pressionados a orientar seus esforços produtivos para deles extrair o máximo de rendimento e performance. A busca por uma otimização de desempenho é ponderada por variáveis antagônicas: a melhoria de produtividade, baseada em sistemas cada vez mais complexos e sofisticados, é quase sempre limitada por restrições orçamentárias e requisitos de segurança.

Dentro desse contexto, diversas técnicas de otimização da performance de sistemas têm sido apresentadas desde meados do século passado. Nos dias de hoje, a publicação de um grande número de trabalhos dedicados a essa questão mostra a atualidade do tema e prova a demanda pelo aperfeiçoamento e desenvolvimento de técnicas de otimização. A aplicação de tais métodos é extremamente abrangente, envolvendo desde a fase conceitual de projetos até a adoção de políticas de manutenção e extensão de vida útil.

A experiência adquirida com a execução de projetos, a operação e a manutenção de sistemas com crescente grau de complexidade, aliadas ao crescimento geométrico de capacidade de processamento, aponta para uma abordagem promissora: o desenvolvimento de técnicas de otimização integrada. Essa integração deve contemplar a interação de todas as fases envolvidas com a operação de sistemas, desde a concepção de sua configuração até o planejamento de manutenção.

Particularmente para a área nuclear, sujeita a rigorosos critérios de segurança e suportada por sofisticados sistemas de controle, a otimização da confiabilidade de sistemas tem um papel fundamental. Justamente neste momento, em que as usinas nucleares brasileiras, em constante processo de modernização, vêm incorporando conceitos atualizados referentes, por exemplo, a restrições técnicas e regras de manutenção, a otimização integrada tem grande aplicabilidade a seus diversos sistemas.

## 1.2. Confiabilidade de Sistemas

De um modo geral, o termo *confiabilidade* pode ser definido como uma medida de performance de sistemas [1]. À medida que os sistemas apresentam maior complexidade, as conseqüências de um comportamento não confiável tornam-se graves em termos de custo, investimentos, disponibilidade, fatores humanos etc. Desta forma, o interesse e a necessidade de aumentar a confiabilidade de produtos e sistemas tornaram-se muito importantes. A confiabilidade de um sistema pode ser definida como a probabilidade que o sistema tem de operar com sucesso durante um intervalo de tempo sob condições estabelecidas. Quando um sistema ou componente deixa de desempenhar corretamente seu objetivo, considera-se que ocorreu uma falha. Nas últimas décadas, o campo da confiabilidade cresceu suficientemente para incluir tópicos especializados, tais como análise de confiabilidade, modelagem de falhas, otimização de confiabilidade, aumento de confiabilidade e sua modelagem, testes de confiabilidade, custos do ciclo de vida útil etc. Em termos mais amplos, a confiabilidade está associada ao desempenho operacional e à redução de falhas, associação essa que traz a necessidade de quantificá-la matematicamente como probabilidade. Além disso, surgem outras quantidades empregadas na caracterização da confiabilidade de sistemas, tais como tempo médio para falhar, tempo médio entre falhas, taxa de falha, ou ainda, para sistemas manuteníveis, grandezas relevantes como disponibilidade, tempo médio para reparo e taxa de reparo.

O crescimento da economia mundial, diante da necessidade de busca por competitividade, pressiona a demanda pela melhoria da performance de produtos e sistemas enquanto, ao mesmo tempo, requer a redução de custos. Concomitantemente, a exigência para minimização da probabilidade de falhas, se essas falhas implicam em aumento de custos ou ameaçam a segurança pública de alguma forma, tem recebido maior ênfase em confiabilidade [1]. Normalmente, para que se obtenha melhor performance de um sistema, é necessário aumentar sua complexidade, freqüentemente através do acréscimo de subsistemas ou componentes. Para que a confiabilidade do sistema não seja penalizada, algumas medidas devem ser tomadas como, por exemplo, utilização de componentes com maior confiabilidade ou alocação de redundância. Obviamente, quaisquer dessas medidas implicam em aumento de custos.

A engenharia de confiabilidade surgiu entre o fim da década de 1940 e o início da década de 1950, inicialmente aplicada aos campos de comunicação e transporte, em

particular aos sistemas eletrônicos. Os altos custos com manutenção, devido à complexidade cada vez maior dos sistemas, levaram à conclusão de que seria mais sensato projetar equipamentos mais confiáveis do que esperar por falhas e ter que repará-los [2].

A década de 1960 testemunhou o surgimento de novas técnicas de análise de confiabilidade, bem como sua extensão a uma grande variedade de aplicações. Por essa época, teve início a análise detalhada de falhas de componentes, bem como seus efeitos sobre a performance de sistemas e sobre a segurança de instalações e pessoal. A grande importância dada a essa nova disciplina teve origem em dois motivos: primeiro, o alto custo com a manutenção de um número crescente de sistemas e que se tornavam cada vez mais sofisticados; segundo, o custo da indisponibilidade desses componentes quando se tornavam incapazes de cumprir seu objetivo. Essa questão foi amplamente examinada pelo setor de energia nuclear, devido à importância da confiabilidade de sistemas em suas áreas de controle e segurança.

Durante as décadas de 1970 e 1980, a indústria nuclear teve participação fundamental nas inovações introduzidas nos métodos de análise de riscos. Em 1975, usinas de energia nuclear foram objetos da primeira avaliação extensiva de risco de uma planta industrial [3]. A partir de então, tais métodos foram gradual e continuamente desenvolvidos, não mais se limitando à confiabilidade e à segurança, mas incorporando novos conceitos, como disponibilidade e manutenibilidade.

Embora o conceito qualitativo de confiabilidade não seja novo, o estado atual de desenvolvimento de seu aspecto quantitativo é resultado justamente dessa crescente necessidade de sistemas e componentes altamente confiáveis, maior segurança e redução de custos. Um dos objetivos da engenharia de confiabilidade é encontrar o melhor caminho para otimizar a confiabilidade de sistemas, e para isso podemos destacar alguns métodos [4]: manter o sistema tão simples quanto compatível com a performance exigida; aumentar a confiabilidade dos componentes; usar redundância em paralelo para componentes e subsistemas menos confiáveis; usar redundância em reserva, a qual entra em operação quando ocorre uma falha; aplicar manutenção corretiva para reparo ou troca de componentes que apresentam falhas; aplicar manutenção preventiva em intervalos previamente estabelecidos.

Nas duas últimas décadas, foram propostas diversas técnicas de análise de confiabilidade. A maioria dessas técnicas transforma o problema original formulado através de modelagem não-linear em um problema de modelagem linear [5]. Mas essa

transformação faz com que aumente excessivamente o número de variáveis e de restrições a se tratar e torna o problema mais difícil em termos de volume de cálculo, o que pode anular as vantagens de tal procedimento. Portanto, se as modificações não trazem o benefício de menor exigência em relação à quantidade de informação a ser tratada, pode ser melhor resolver o problema de projeto de confiabilidade original sem qualquer transformação. Desta forma, a diversidade de fatores dos problemas originais é a motivação para o uso de algoritmos genéticos [6,7]. Um algoritmo genético (AG) é uma poderosa ferramenta para otimização, aplicável na resolução de problemas de projeto de confiabilidade e capaz de trabalhar com todo tipo de função objetivo não-linear e de restrições, sem qualquer transformação.

### **1.3. Revisão Bibliográfica**

Desde o início da década de 1980 várias publicações foram dedicadas ao estudo da confiabilidade de sistemas, incluindo o emprego de redundância, e várias técnicas de otimização são apresentadas. Entre essas técnicas [4], pode-se citar programação linear, programação geométrica, método dos multiplicadores de Lagrange e condições de Kuhn-Tucker, método do gradiente reduzido generalizado, dentre outros. Em torno de 1990, o desenvolvimento de métodos de cálculo de confiabilidade experimentou grandes avanços. Porém, conceitos de amostragem por importância, que fornece estimativa de erro juntamente com a estimativa da probabilidade, lançado em 1983, e variação temporal de confiabilidade precisavam ser considerados [8]. No início da década de 1990, já se dominava suficientemente bem o cálculo de probabilidades de falha, incrementando a otimização baseada na confiabilidade, mas questionava-se se a análise de confiabilidade era tudo que se desejava obter.

Através desses anos, a importância da manutenção, e conseqüentemente o gerenciamento da manutenção, teve grande desenvolvimento [9,10]. A otimização da manutenção, em termos gerais, consiste em modelos matemáticos voltados à busca ou do balanço ótimo entre custos e benefícios da manutenção ou do momento mais adequado para se executar a manutenção. A primeira tentativa científica de gerenciamento de manutenção data das décadas de 1950 e 1960, quando a manutenção preventiva foi vista como um meio de se reduzir o número de falhas e de ociosidade não planejada. A partir daí, programas de manutenção preventiva foram aplicados em larga

escala. Na década de 1970, o monitoramento das condições, focado em técnicas de predição de falhas usando informações sobre o estado real de equipamentos, permitiu um avanço nos programas de manutenção preventiva. O resultado foi a melhoria dos projetos, com menor número de falhas. Nas décadas de 1980 e 1990, houve um grande impulso computacional, e duas importantes técnicas, que passaram a ser mais utilizadas, devem ser mencionadas: Manutenção Centrada na Confiabilidade, que é baseada na análise de modos de falha, seus efeitos e as maneiras de preveni-las, e Manutenção Produtiva Total, que estabelece que problemas de manutenção e produção devem ser resolvidos conjuntamente [9,10].

Mais recentemente, o contínuo avanço na velocidade e na capacidade de processamento tem feito com que as limitações relacionadas a tempo computacional deixem de ser significativas, estimulando o desenvolvimento de novas técnicas e aplicações. A política de manutenção preventiva passou a considerar as incertezas quanto aos parâmetros aos quais está sujeita [11-13], impondo uma nova dinâmica ao seu planejamento e ao processo de otimização. Outro aspecto que tem recebido destacado interesse devido à sua relevância em termos econômicos é a interação de planejamentos de manutenção e produção [14], sem cujo adequado estudo dificilmente se atingiria um grau ótimo de utilização do potencial produtivo. Outra proposta apresentada para otimização de projeto baseado em confiabilidade propõe o completo desacoplamento entre método de cálculo de confiabilidade e algoritmo de otimização, permitindo flexibilidade na aplicação das respectivas técnicas [15]. Metodologias são desenvolvidas e aplicadas, também, no tratamento de sistemas sob envelhecimento, seja para cálculo de confiabilidade [16] ou abrangendo políticas de manutenção [17]. Quanto à alocação de redundância com o objetivo de aumentar a confiabilidade de sistemas, tem sido freqüente a publicação de trabalhos com metodologias alternativas [18,19]. Alguns trabalhos sobre otimização de projetos de sistemas manuteníveis consideram a relevância dos custos envolvidos, com aplicação a sistemas série-paralelo [20], sistemas com componentes em série [21] ou sistemas em reserva a frio [22]. A aplicação de computação evolucionária também tem sido objeto de desenvolvimento de novas técnicas [23,24].

Diferentes métodos de análise de confiabilidade são usados para aperfeiçoar a disponibilidade de sistemas durante a fase de projeto. Os resultados desses estudos fornecem informações qualitativas e quantitativas que podem ser usadas para cálculo de desempenho operacional e aumento de disponibilidade. Em muitos casos, o cálculo de

disponibilidade somente é feito após a maior parte das decisões de projeto ter sido tomada, como estrutura ou dimensionamento de equipamentos, e, uma vez que a estrutura foi determinada na etapa de síntese, pode ser muito oneroso implantar os resultados dos estudos de disponibilidade, se alguma mudança estrutural for necessária. Diferentes métodos de otimização de manutenção podem ser usados para incrementar a disponibilidade, onde se estabelece uma relação entre os custos de manutenção e seus benefícios (aumento de disponibilidade). Porém, comumente os métodos são aplicados a estruturas definidas e os modelos são formulados independentemente do projeto. Essa abordagem *a posteriori* não contempla a interação entre manutenção e parâmetros de projeto e limita a otimização de disponibilidade. Devido a tais limitações, busca-se uma abordagem *a priori*, onde se trata simultaneamente síntese de estrutura, projeto, confiabilidade e manutenção [25-27]. A limitação desse tipo de tratamento está na possibilidade do problema de otimização exigir grande esforço computacional.

Dentro do campo de otimização de confiabilidade e planejamento de testes e manutenções, há que se destacar o papel desempenhado pelos algoritmos genéticos. Essa técnica é aplicada a diversos problemas de alocação ótima de confiabilidade [5], como, por exemplo: maximização da confiabilidade de sistemas sujeitos a restrições não-lineares [28]; otimização multiobjetivo fornecendo um espectro de soluções ótimas (Pareto) [29]; otimização da estrutura de sistemas multiestado consistindo de elementos caracterizados por confiabilidades e taxas de desempenho nominal diferentes [30]; otimização de confiabilidade para sistemas de votação ponderada [31]; otimização de redundância em múltiplos níveis para sistemas em série [32]; aumento de eficiência de projeto e apoio à tomada de decisão [33].

Especificamente dentro do âmbito da engenharia nuclear, os estudos de otimização baseados na aplicação de algoritmos genéticos têm recebido especial dedicação, e pode-se destacar aplicações recentes que ilustram a importância que a técnica vem assumindo nessa área da engenharia. A minimização do fator de pico em três zonas de enriquecimento foi investigada através de ajuste de diversos parâmetros, como raio do combustível, espessura do revestimento do combustível, materiais empregados, etc [34]. Outro estudo teve como objetivo otimizar o gerenciamento do combustível em reatores do tipo PWR [35]. A exemplo de outras áreas, aplicam-se algoritmos genéticos para alocação de confiabilidade em usinas nucleares [36], levando em consideração os custos envolvidos com aumento/redução da confiabilidade e aspectos de segurança. Ainda do ponto de vista de análise de segurança, abordando



política de manutenção preventiva ou intervalos de testes, trabalhos trouxeram propostas de otimização, seja ela focada na maximização de disponibilidade de sistemas [37,38] ou na minimização de custos sob restrições de risco e performance [39,40]. Outra contribuição relevante para a maximização da disponibilidade de sistemas foi feita considerando-se restrições sazonais na determinação do planejamento de testes [41], permitindo uma descrição mais realista do contexto de otimização. Destaca-se a importância e a atualidade de estudos de otimização multiobjetivo que contemplem de forma integrada especificações técnicas e manutenção, visando a maximizar confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e minimizar custos [42-44]. Por fim, a otimização integrada, que engloba desde a concepção da estrutura de sistemas até a política de manutenção preventiva e testes, tem sido aplicada a sistemas de segurança de usinas nucleares [45].

#### **1.4. Motivação**

O grande volume de trabalhos publicados nos últimos anos demonstra a relevância de se desenvolver e aperfeiçoar técnicas de otimização de confiabilidade, incorporando um maior número de parâmetros e ampliando a contextualização do problema na busca por uma otimização integrada. Essa abordagem mais ampla permite que se disponha de modelagens cada vez mais próximas de situações reais, efetivamente encontradas nas mais variadas configurações de sistemas. Por outro lado, um tratamento mais abrangente, que tente descrever de maneira integrada os fatores envolvidos desde a concepção de estruturas até a política de manutenção, torna o problema de otimização extremamente mais complexo. Como já foi colocado, diversos métodos são usados para aperfeiçoar a disponibilidade de sistemas durante a fase de projeto [25-27]. A maioria dessas técnicas, porém, transforma o problema original para lhe conferir alguma linearidade e permitir um tratamento mais convencional. Essa transformação faz com que aumente excessivamente o número de variáveis e de restrições a se tratar. Outra penalização para tais métodos é permitir que a descrição de alguns parâmetros sofra modificações, levando a modelagem do problema a se desviar de formulações mais realistas.

Ultimamente, no entanto, as restrições ao desenvolvimento de novas técnicas, impostas por estas demandarem maior desempenho computacional, têm se tornado

menos significativas. Esse fato traz uma tendência de declínio para técnicas que não privilegiem uma visão integrada dos aspectos envolvidos nos processos de otimização. Com um tratamento mais global, procura-se contornar as limitações apresentadas na particularização do problema a apenas alguns fatores, como em casos em que o cálculo de disponibilidade somente é feito após o projeto do sistema estar definido. Vale enfatizar que essa abordagem *a posteriori* não contempla a interação entre manutenção e parâmetros de projeto e limita a otimização de disponibilidade.

Esta é exatamente a motivação para o presente trabalho: a busca por uma abordagem *a priori*, onde se trate simultaneamente, e de forma integrada, os fatores relacionados à operação dos sistemas, modelando e resolvendo o problema original. Para apoiar estudos com as características citadas, o uso de algoritmos genéticos tem-se mostrado uma excelente alternativa.

## 1.5. Objetivos

A tese visa a atingir, seqüencialmente, os seguintes objetivos:

- (i) desenvolver uma modelagem para aplicação em otimização integrada que seja flexível para ser adaptada a diversos sistemas;
- (ii) estudar a aplicação da modelagem a um sistema hipotético, comparando com a otimização *a posteriori*;
- (iii) fazer aplicação da modelagem a uma proposta de modificação de projeto de um sistema de segurança da usina nuclear de Angra I, demonstrando a aplicabilidade e a relevância da utilização da técnica.

## 1.6. Organização do Trabalho

Uma modelagem matemática para cálculo de disponibilidade de componentes e de sistemas é desenvolvida no Capítulo 2, com os respectivos planejamentos de manutenções/testes e estimativas de custos. Ainda nesse capítulo, são propostas uma formulação para a função objetivo e uma estrutura de genótipo para o algoritmo genético, para aplicação no processo de otimização integrada.

No Capítulo 3, o modelo desenvolvido para a otimização integrada é aplicado a um sistema hipotético.

No Capítulo 4 estão os dados utilizados no processo de otimização e os resultados obtidos para o sistema hipotético, com a respectiva análise e a comparação com a otimização *a posteriori*.

O Capítulo 5 traz uma descrição do Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle da Usina de Angra I, ao qual fez-se uma aplicação real da modelagem proposta, considerando a possibilidade de modificação do projeto atual.

No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados da otimização do Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle da Usina de Angra I.

No Capítulo 7 são feitas as conclusões e considerações finais.

## Capítulo 2

### – Modelagem para Otimização Integrada de Sistemas –

#### 2.1. Introdução

A modelagem matemática para o cálculo da disponibilidade de componentes visa a aplicação da otimização integrada a possíveis configurações de sistemas em geral. O objetivo inicial, neste capítulo, é desenvolver um conjunto de equações que sirvam de base matemática para descrever o comportamento da disponibilidade de componentes em função do tempo [46]. A partir do cálculo da disponibilidade dos componentes, chega-se à disponibilidade de subsistemas e sistemas.

Primeiramente, são desenvolvidas as equações para o cálculo da disponibilidade de componentes em regime de operação (componente ativo). A seguir, são obtidas as equações para componentes que estejam submetidos a alguma forma de regime em espera (componente reserva). Iniciando pela modelagem de cada componente individualmente, poderá ser feito o equacionamento da disponibilidade do sistema a partir das disponibilidades dos componentes que o integram.

Uma proposta de planejamento de manutenções preventivas e testes é desenvolvida a seguir. O objetivo desse modelo é orientar a busca da distribuição de intervenções ao longo do período analisado, durante o processo de otimização.

Os cálculos relativos a custos deverão ser feitos particularmente em função da estrutura de cada sistema. Neste capítulo é apresentado um modelo para estimativa dos custos relativos a um componente, que deve ser adaptado às características particulares de cada componente do sistema. Os custos com os componentes, juntamente com a possibilidade de lucro cessante, compõem os custos totais do sistema.

Uma formulação geral para a função de avaliação a ser empregada na otimização integrada de sistemas é desenvolvida com o intuito de contemplar de maneira ponderada, de acordo com o sistema estudado, a relação entre disponibilidade, rendimento e custos totais.

Por fim, é proposto um modelo esquematizado do genótipo a ser utilizado pelo algoritmo genético, que inclui as variáveis relativas ao problema de otimização, o qual deve ser adaptado às características do sistema em estudo.

## 2.2. Disponibilidade de Componentes

A partir dos conceitos básicos do cálculo de confiabilidade, neste item são desenvolvidas equações que descrevem o comportamento da disponibilidade de componentes em função do tempo, tanto para componentes em operação contínua (componentes ativos) quanto para aqueles submetidos a algum regime de espera (componentes reservas).

Buscando uma caracterização realista desse comportamento, é introduzido no cálculo de disponibilidade um fator de recondicionamento que indica o quão próximo ao novo o componente retorna após uma manutenção preventiva ou teste. Além disso, propõe-se aqui considerar, para um componente que ora esteja ativo ora em reserva, a distinção entre os períodos de tempo em que efetivamente esteve em operação ou em espera, descrevendo, dessa forma, o comportamento do componente durante os diferentes regimes a que está submetido.

### 2.2.1. Componente ativo

Primeiramente, define-se que as taxas de falha têm a forma de uma distribuição de Weibull a dois parâmetros. Este tipo de distribuição é amplamente usado em cálculos de confiabilidade devido à sua versatilidade, o que permite, através de uma escolha adequada de parâmetros de escala ( $\theta$ ) e de forma ( $m$ ), modelar uma grande variedade de comportamentos de taxas de falha [1]. A taxa de falha do componente,  $\lambda(t)$ , é dada por

$$\lambda(t) = \frac{m_a}{\theta_a} \left( \frac{t}{\theta_a} \right)^{m_a-1} + \frac{m_b}{\theta_b} \left( \frac{t}{\theta_b} \right)^{m_b-1} + \frac{m_c}{\theta_c} \left( \frac{t}{\theta_c} \right)^{m_c-1}, \quad (2.1)$$

onde se adota  $0 < m_a < 1$ ,  $m_b = 1$  e  $m_c > 1$ . O primeiro termo é decrescente e está ligado a falhas prematuras, no início de operação do componente. O segundo é constante, associado a falhas randômicas que podem ocorrer durante a sua operação. E por fim, o terceiro termo, crescente, corresponde às falhas causadas pelo envelhecimento. Dessa forma, a “curva da banheira” pode ser expressa como uma superposição de taxas de falha com distribuição de Weibull [1]. A Eq.2.1 é uma prática representação empírica para o comportamento da taxa de falha tanto para contribuições independentes quanto

para situações onde os termos individuais não estão unicamente associados à falhas prematuras, randômicas e por envelhecimento.

A confiabilidade do componente,  $R(t)$ , é dada por

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t') dt' \right], \quad (2.2)$$

e inserindo a Eq.2.1 na Eq.2.2, obtém-se

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\theta_a} \right)^{m_a} - \left( \frac{t}{\theta_b} \right)^{m_b} - \left( \frac{t}{\theta_c} \right)^{m_c} \right]. \quad (2.3)$$

Porém, o componente será submetido a manutenção preventiva e, em caso de falha, é previsto que seja efetuado reparo através de manutenção corretiva, o que torna importante caracterizar o comportamento do componente durante sua vida útil através de sua disponibilidade,  $A(t)$ . Admitindo-se uma taxa de reparo  $\nu(t)$ , pode-se desenvolver uma expressão para a disponibilidade do componente. A variação de  $A(t)$  entre  $t$  e  $\Delta t$  provém de duas contribuições: a falha durante  $\Delta t$ , dado que o sistema esteja disponível em  $t$  e o reparo durante  $\Delta t$ , dado que o sistema esteja indisponível em  $t$ . Assim, vem

$$A(t + \Delta t) = A(t) - \lambda(t)\Delta t A(t) + \nu(t)\Delta t \tilde{A}(t), \quad (2.4)$$

onde  $\tilde{A}(t)$  é a indisponibilidade, dada por  $\tilde{A}(t) = 1 - A(t)$ . Eliminando  $\tilde{A}(t)$  na Eq.2.4 e rearranjando os termos obtém-se

$$\frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} = -[\lambda(t) + \nu(t)]A(t) + \nu(t). \quad (2.5)$$

Fazendo  $\Delta t \rightarrow 0$ , o primeiro membro é a expressão da derivada de  $A(t)$  no tempo e tem-se a seguinte equação diferencial:

$$\frac{dA(t)}{dt} = -[\lambda(t) + \nu(t)]A(t) + \nu(t). \quad (2.6)$$

Utilizando o fator integrante  $e^{\int [\lambda(t)+v(t)] dt}$  chega-se a

$$\frac{d}{dt} \left( A(t) \exp \left[ \int [\lambda(t) + v(t)] dt \right] \right) = v(t) \exp \left[ \int [\lambda(t) + v(t)] dt \right]. \quad (2.7)$$

Admitindo-se que  $\lambda(t)$  tem a forma dada pela Eq.2.1 e que a taxa de reparo é constante,  $v(t) = v$ , tem-se

$$\int [\lambda(t) + v(t)] dt = \left( \frac{t}{\theta_a} \right)^{m_a} + \left( \frac{t}{\theta_b} \right)^{m_b} + \left( \frac{t}{\theta_c} \right)^{m_c} + vt + C. \quad (2.8)$$

Substituindo a Eq.2.8 na Eq.2.7 e considerando a seguir a expressão para  $R(t)$  dada pela Eq.2.3, pode-se escrever

$$\frac{d}{dt} \left( A(t) \frac{e^{vt}}{R(t)} \right) = v \frac{e^{vt}}{R(t)}. \quad (2.9)$$

Como o componente ativo será submetido a manutenções preventivas, aplicadas em instantes estabelecidos por meio do processo de otimização, após cada manutenção inicia-se um novo ciclo no que tange à confiabilidade e à disponibilidade do componente. Por esse motivo, a Eq.2.9 deve ser resolvida particularmente para cada intervalo entre manutenções. O tempo utilizado para se proceder à manutenção preventiva,  $\tau_{mp}$ , é

$$\tau_{mp} = T_i - T_i', \quad (2.10)$$

onde  $T_i'$  é o instante do início da  $i$ -ésima manutenção preventiva e  $T_i$  é o instante em que o componente é disponibilizado após esta manutenção.

Inicialmente, determina-se a disponibilidade durante o primeiro ciclo,  $A_0(t)$ , que se inicia com a entrada em operação do componente, no instante  $t = 0$ , e termina com a conclusão da primeira manutenção preventiva, em  $t = T_1$ . Integrando ambos os membros

da Eq.2.9, de zero até um instante  $t < T_1'$ , e utilizando a condição inicial  $A_0(0) = 1$ , resulta

$$\int_0^t \frac{d}{dt'} \left( A_0(t') \frac{e^{vt'}}{R_0(t')} \right) dt' = v \int_0^t \frac{e^{vt'}}{R_0(t')} dt' , \quad 0 \leq t < T_1' , \quad (2.11)$$

$$A_0(t) \frac{e^{vt}}{R_0(t)} - 1 = v \int_0^t \frac{e^{vt'}}{R_0(t')} dt' , \quad 0 \leq t < T_1' . \quad (2.12)$$

onde  $R_0(t)$  é a confiabilidade correspondente ao primeiro ciclo, em que  $0 \leq t < T_1$ , exatamente como expressa pela Eq.2.3.

Chega-se, então, à expressão da disponibilidade do componente durante o primeiro ciclo, lembrando que esta vai a zero durante a manutenção:

$$\begin{cases} A_0(t) = R_0(t) \cdot e^{-vt} \left[ v \cdot \int_0^t \frac{e^{vt'}}{R_0(t')} dt' + 1 \right] , & 0 \leq t < T_1' , \\ A_0(t) = 0 , & T_1' \leq t < T_1 , \end{cases} \quad (2.13)$$

Note-se que o integrando presente na Eq.2.13 é conhecido e pode facilmente ser integrado numericamente [47,48].

Antes de chegar à formulação da disponibilidade do componente ativo para os ciclos subsequentes, deve-se ressaltar que a manutenção preventiva não necessariamente garante que o componente retorne a um estado tão bom quanto novo. Isso significa que a confiabilidade após o componente ser novamente disponibilizado, após a manutenção, pode ter um comportamento diferente da condição de início de operação. Para tratar esse aspecto, introduz-se na expressão da confiabilidade um novo parâmetro,  $\alpha(t)$ , denominado fator de recondicionamento, que indica o quão próximo ao novo o componente retornará após a manutenção preventiva. Dessa forma, após a realização da  $i$ -ésima manutenção preventiva, a confiabilidade passará a ser calculada não em função de  $(t - T_i)$ , mas em função de  $(t - \alpha(t) T_i)$ , isto é, passa a ser  $R(t - \alpha(t) T_i)$ , onde  $0 \leq \alpha(t) \leq 1$ .



Adotando um índice para identificar o ciclo correspondente e expressando, a partir daqui,  $\alpha(t)$  simplesmente como  $\alpha$ , a expressão da confiabilidade fica

$$R_i(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t - \alpha T_i}{\theta_a} \right)^{m_a} - \left( \frac{t - \alpha T_i}{\theta_b} \right)^{m_b} - \left( \frac{t - \alpha T_i}{\theta_c} \right)^{m_c} \right], \quad T_i \leq t < T_{i+1}. \quad (2.14)$$

Um valor unitário de  $\alpha$  equivale a restaurar o sistema à condição de tão bom quanto novo, enquanto  $\alpha$  igual a zero indica que a manutenção não teve qualquer efeito sobre a confiabilidade do componente.

Por outro lado, no instante exato em que o sistema é novamente posto em operação, após ter sido concluída sua manutenção preventiva, é obviamente nula a probabilidade de já ter sido efetuado algum reparo. Isso equivale a dizer que o fator  $\exp[\nu t]$  retorna à condição do início de operação do componente, passando a ser  $\exp[\nu(t - T_i)]$ .

A expressão da disponibilidade após a primeira manutenção preventiva,  $A_1(t)$ , é obtida, primeiramente, reescrevendo-se a Eq.2.9 com os novos termos  $R(t - \alpha T_i)$  e  $\exp[\nu(t - T_i)]$ .

$$\frac{d}{dt} \left( A_1(t) \frac{e^{\nu(t-T_1)}}{R_1(t)} \right) = \nu \frac{e^{\nu(t-T_1)}}{R_1(t)}, \quad (2.15)$$

e a seguir, integrando ambos os membros da Eq.2.15 de  $T_1$  até um instante qualquer  $t$ , em que  $T_1 \leq t < T_2'$ . Utilizando a condição inicial  $A_1(T_1) = R_1(T_1)$ , chega-se ao seguinte resultado:

$$\int_{T_1}^t \frac{d}{dt'} \left( A_1(t') \frac{e^{\nu(t'-T_1)}}{R_1(t')} \right) dt' = \nu \int_{T_1}^t \frac{e^{\nu(t'-T_1)}}{R_1(t')} dt', \quad T_1 \leq t < T_2', \quad (2.16)$$

$$A_1(t) \frac{e^{\nu(t-T_1)}}{R_1(t)} - 1 = \nu \int_{T_1}^t \frac{e^{\nu(t'-T_1)}}{R_1(t')} dt', \quad T_1 \leq t < T_2'. \quad (2.17)$$

De modo semelhante ao apresentado anteriormente, a expressão da disponibilidade para o ciclo imediatamente posterior à primeira manutenção preventiva é dada por

$$\begin{cases} A_1(t) = R_1(t) \cdot e^{-v \cdot (t-T_1)} \left[ v \cdot \int_{T_1}^t \frac{e^{v \cdot (t'-T_1)}}{R_1(t')} dt' + 1 \right], & T_1 \leq t < T'_2, \\ A_1(t) = 0, & T'_2 \leq t < T_2. \end{cases} \quad (2.18)$$

Pode-se, então, chegar a uma generalização para o  $i$ -ésimo termo  $A_i(t)$ , como segue:

$$\begin{cases} A_i(t) = R_i(t) \cdot e^{-v \cdot (t-T_i)} \left[ v \cdot \int_{T_i}^t \frac{e^{v \cdot (t'-T_i)}}{R_i(t')} dt' + 1 \right], & T_i \leq t < T'_{i+1}, \\ A_i(t) = 0, & T'_{i+1} \leq t < T_{i+1}, \end{cases} \quad (2.19)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , sendo  $n$  o número de manutenções preventivas realizadas durante todo o tempo de operação do componente. Finalmente, o termo referente ao último ciclo é expresso por

$$A_n(t) = R_n(t) \cdot e^{-v \cdot (t-T_n)} \left[ v \cdot \int_{T_n}^t \frac{e^{v \cdot (t'-T_n)}}{R_n(t')} dt' + 1 \right], \quad T_n \leq t \leq T_f, \quad (2.20)$$

onde  $T_f$  é o tempo de operação do sistema.

Entretanto, uma grandeza de interesse fundamental para os cálculos de otimização, inclusive na determinação de custos, é a disponibilidade média do componente,  $A^*(T_f)$ , durante o tempo de operação do sistema,  $T_f$ . A disponibilidade média é obtida através da equação

$$A^*(T_f) = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} A(t) dt \quad . \quad (2.21)$$

### 2.2.2. Componente reserva

A taxa de falha do componente redundante terá a forma dada pela Eq.2.1, sendo que para um mesmo componente os parâmetros  $\theta$  e  $m$  assumirão valores diferentes caso este esteja ativo ou em reserva. Durante o tempo de funcionamento do sistema, o componente em reserva será submetido a testes, que podem incluir ações preventivas. Os intervalos entre testes são variáveis e serão determinados no processo de otimização. A disponibilidade do componente em reserva será uma ponderação entre dois regimes distintos: primeiro, quando houver disponibilidade do(s) componente(s) destinado(s) preferencialmente a estar em operação, o reserva estará inativo e submetido às taxas de falha de componente em reserva; segundo, quando o(s) componente(s) destinado(s) preferencialmente a operar estiver(em) indisponíveis, o que estava em reserva entra em atividade, submetendo-se às taxas de falha de componente em operação.

Para tratar a questão dos regimes distintos a que o componente em reserva está submetido, são definidos dois parâmetros: tempo equivalente em reserva,  $t_r$ , que corresponde à parcela do intervalo de tempo decorrido,  $t$ , em que o componente esteve inativo; e tempo equivalente em operação,  $t_o$ , relativo ao tempo em que o componente esteve efetivamente em atividade. Esses parâmetros serão utilizados no cálculo da confiabilidade, detalhado adiante. Enquanto não for demandado para entrar em operação, o componente reserva permanece inativo. Isso significa que  $t_r$  é proporcional à disponibilidade média dos componentes que devem estar preferencialmente ativos no intervalo  $t$ ,  $A_{at}^*(t)$ , ou seja,

$$t_r = t \cdot A_{at}^*(t) \quad . \quad (2.22)$$

Utilizando a Eq.2.21, conclui-se que

$$t_r = t \cdot \frac{1}{t} \int_0^t A_{at}(t') dt' \quad , \quad (2.23)$$

$$t_r = \int_0^t A_{at}(t') dt' \quad . \quad (2.24)$$

Como as parcelas  $t_r$  e  $t_o$  correspondem ao intervalo total  $t$ , tem-se, ainda, que

$$t_o = t - \int_0^t A_{ar}(t') dt' \quad . \quad (2.25)$$

A exemplo do estabelecido para as manutenções preventivas do componente ativo, o tempo de teste,  $\tau_i$ , é dado por

$$\tau_i = T_i - T_i', \quad (2.26)$$

onde  $T_i'$  é o instante do início do  $i$ -ésimo teste e  $T_i$  é o instante em que o componente é disponibilizado após o  $i$ -ésimo teste.

A confiabilidade será composta dos fatores  $R_r$  e  $R_o$ , relacionados aos períodos de reserva e de operação, respectivamente, e que possuem seus próprios parâmetros de forma e escala. Cada fator é calculado em seu tempo equivalente correspondente, isto é,  $R_r = R_r(t_r)$  e  $R_o = R_o(t_o)$ .

A disponibilidade até o primeiro teste,  $A_0(t)$ , é dada, então, por

$$\begin{cases} A_0(t) = R_{r,0}(t_r) \cdot A_{o,0}(t_o), & 0 \leq t < T_1', \\ A_0(t) = 0, & T_1' \leq t < T_1. \end{cases} \quad (2.27)$$

Na Eq.2.27, o fator  $A_{o,0}(t_o)$  representa a disponibilidade do componente considerando-se o tempo equivalente em operação, sendo calculado conforme as equações anteriormente desenvolvidas para componente ativo. A aplicação desse termo permite considerar a situação em que, após falha do componente ativo e entrada em operação do componente em reserva, haja a possibilidade de reparo deste último, caso venha também a falhar, independentemente do reparo do componente ativo.

A exemplo do que foi descrito para o componente ativo, deve-se ressaltar que os testes, mesmo admitindo ações de caráter preventivo, não garantem que o componente retorne a um estado tão bom quanto novo, fato este que é tratado também utilizando o parâmetro  $\alpha$ . Desta forma, após o  $i$ -ésimo teste, a confiabilidade passará a ser dada por

$R(t - \alpha T_i)$ . Adotando novamente índices para relacionar a disponibilidade com seu respectivo ciclo, temos

$$R_{r,i}(t_r) = \exp \left[ - \left( \frac{t_r - \alpha_r T_{r,i}}{\theta_{a,r}} \right)^{m_{a,r}} - \left( \frac{t_r - \alpha_r T_{r,i}}{\theta_{b,r}} \right)^{m_{b,r}} - \left( \frac{t_r - \alpha_r T_{r,i}}{\theta_{c,r}} \right)^{m_{c,r}} \right], \quad (2.28)$$

$$T_{r,i} \leq t_r < T_{r,i+1},$$

$$R_{o,i}(t_o) = \exp \left[ - \left( \frac{t_o - \alpha_o T_{o,i}}{\theta_{a,o}} \right)^{m_{a,o}} - \left( \frac{t_o - \alpha_o T_{o,i}}{\theta_{b,o}} \right)^{m_{b,o}} - \left( \frac{t_o - \alpha_o T_{o,i}}{\theta_{c,o}} \right)^{m_{c,o}} \right], \quad (2.29)$$

$$T_{o,i} \leq t_o < T_{o,i+1},$$

onde  $T_{r,i}$  e  $T_{o,i}$  são os instantes equivalentes a  $T_i$  para os regimes de reserva e de operação, respectivamente.

Além disso, a partir de agora, na expressão da disponibilidade, deve-se considerar a probabilidade do componente estar indisponível após o teste e haver a necessidade de se efetuar reparo. Essa probabilidade,  $P_{\tilde{A}}$ , corresponde à indisponibilidade do componente no instante imediatamente anterior ao início do teste, acrescida da probabilidade do componente falhar durante o teste, dado que estava disponível em seu início. Identificando cada  $P_{\tilde{A}}$  com seu ciclo correspondente por índices, semelhantemente ao que foi feito para a confiabilidade, sua expressão fica

$$P_{\tilde{A},i} = \left\{ 1 - A_{i-1}(t \rightarrow T_i'^-) \right\} + \left( 1 - \frac{R_{r,i-1}(t_r \rightarrow T_{r,i}^-) \cdot R_{o,i-1}(t_o \rightarrow T_{o,i}^-)}{R_{r,i-1}(t_r = T_{r,i}') \cdot R_{o,i-1}(t_o = T_{o,i}')} \right) \cdot A_{i-1}(t \rightarrow T_i'^-), \quad (2.30)$$

$$P_{\tilde{A},i} = 1 - A_{i-1}(t \rightarrow T_i'^-) \frac{R_{r,i-1}(t_r \rightarrow T_{r,i}^-) \cdot R_{o,i-1}(t_o \rightarrow T_{o,i}^-)}{R_{r,i-1}(t_r = T_{r,i}') \cdot R_{o,i-1}(t_o = T_{o,i}')}, \quad (2.31)$$

onde a notação  $f(t \rightarrow x^-)$  indica o limite da função  $f(t)$  quando  $t$  tende a  $x$  pela esquerda, e  $T'_{r,i}$  e  $T'_{o,i}$  são os instantes equivalentes a  $T'_i$  para os regimes de reserva e de operação, respectivamente.

Chega-se, então, à expressão da disponibilidade para o ciclo subsequente ao primeiro teste,  $A_1(t)$ :

$$\begin{cases} A_1(t) = R_{r,1}(t_r) \cdot A_{o,1}(t_o) \cdot \left\{ 1 - P_{\tilde{A},1} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_1)] \right\}, & T_1 \leq t < T'_2, \\ A_1(t) = 0, & T'_2 \leq t < T_2. \end{cases} \quad (2.32)$$

Partindo da Eq.2.32, pode-se generalizar a expressão da disponibilidade para o  $i$ -ésimo termo  $A_i(t)$ , como segue:

$$\begin{cases} A_i(t) = R_{r,i}(t_r) \cdot A_{o,i}(t_o) \cdot \left\{ 1 - P_{\tilde{A},i} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_i)] \right\}, & T_i \leq t < T'_{i+1}, \\ A_i(t) = 0, & T'_{i+1} \leq t < T_{i+1}, \end{cases} \quad (2.33)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , sendo  $n$  o número de testes realizados. Por fim, o último termo é dado por

$$A_n(t) = R_{r,n}(t_r) \cdot A_{o,n}(t_o) \cdot \left\{ 1 - P_{\tilde{A},n} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_n)] \right\}, \quad T_n \leq t \leq T_f, \quad (2.34)$$

onde  $T_f$  é o tempo de operação do sistema.

A disponibilidade média para o componente redundante é dada também pela Eq.2.21.

### 2.3. Manutenções Preventivas e Testes

Os instantes em que os componentes ativos serão submetidos a manutenções preventivas e os reservas a testes deverão ser determinados no processo de otimização. Essa busca por uma programação de manutenções preventivas/testes que maximizem o

ganho com a operação do sistema pode seguir um processo aleatório, em que todas as combinações de instantes são consideradas candidatas a soluções [37,38,41]. Porém, intuitivamente, espera-se que esses instantes selecionados sigam algum padrão de distribuição. Por exemplo, é razoável supor que a frequência de testes aumente à medida que o sistema envelhece. Esta consideração induz a optar-se por uma modelagem que busque soluções para o planejamento de manutenções preventivas, ou testes, com alguma ordenação nessa distribuição [50]. O benefício de tal abordagem é limitar o universo de soluções consideradas válidas, eliminando aquelas que não têm sentido prático. Desta forma, espera-se ganhar eficiência e tempo computacional.

Várias formas de direcionar essa busca por soluções ótimas podem ser sugeridas. Neste trabalho, três delas são apresentadas, sendo que o próprio processo de otimização fará a opção entre elas para cada componente

### 2.3.1. Distribuição proporcional

Na distribuição proporcional, os intervalos entre manutenções preventivas/testes, a partir de agora chamados genericamente de intervenções, são diretamente proporcionais entre si e seguem uma progressão geométrica. O primeiro intervalo,  $\Delta T_1$ , vai do início de operação, em  $t = 0$ , até o instante final da primeira intervenção,  $T_1$ :

$$\Delta T_1 = T_1 - 0 = T_1 . \quad (2.35)$$

Os intervalos seguintes são dados por

$$\Delta T_{i+1} = \beta \cdot \Delta T_i , \quad 0 < \beta \leq 1 , \quad (2.36)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $\Delta T_i$  é o  $i$ -ésimo intervalo de tempo e o fator  $\beta$ , denominado fator de distribuição, é de proporcionalidade. Um valor unitário de  $\beta$  significa que os instantes de intervenção são uniformemente distribuídos, isto é, os intervalos entre as intervenções são todos iguais. Na verdade, a seqüência dos valores dos intervalos forma uma progressão geométrica, cuja razão é  $\beta$ .

O último intervalo,  $\Delta T_{n+1}$  está compreendido entre o instante final da última intervenção,  $T_n$ , e o fim de operação,  $T_f$ , e também pode ser dado por:

$$\Delta T_{n+1} = T_f - T_n . \quad (2.37)$$

Considerando que sejam previstas  $n$  intervenções durante o tempo de operação do componente, a expressão para a determinação de  $\Delta T_1$ , em função de  $T_f$ ,  $n$  e  $\beta$ , é dada por

$$\Delta T_1 = \frac{T_f (1 - \beta)}{1 - \beta^{n+1}} . \quad (2.38)$$

Os demais intervalos podem ser calculados a partir de  $\Delta T_1$  pela Eq.2.36. Uma vez determinados todos os intervalos, tem-se a relação dos instantes em que as intervenções deverão ser feitas.

### 2.3.2. Distribuição exponencial

Na distribuição exponencial, os instantes entre intervenções, seguem a seguinte relação

$$T_i = T_1 \cdot i^\beta , \quad 0 < \beta \leq 1 , \quad (2.39)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n+1$ , e o fator de distribuição  $\beta$  é o expoente.

Notando que  $T_{n+1} = T_f$ , e havendo uma previsão de  $n$  intervenções, chega-se a expressão

$$T_1 = \frac{T_f}{(n+1)^\beta} , \quad (2.40)$$

Uma vez determinado o valor de  $T_1$ , tem-se a relação dos instantes em que as intervenções deverão ser feitas utilizando a Eq.2.39.



### 2.3.3. Valor limite de disponibilidade

Nesta forma de estabelecer os instantes das intervenções, simplesmente se estabelece um valor mínimo aceitável que a disponibilidade pode atingir [12]. Toda vez que esse valor for atingido, procede-se à intervenção.

## 2.4. Custos

### 2.4.1. Custos de componente

Os custos totais relacionados à operação do sistema são provenientes de várias fontes. A primeira é a aquisição de cada componente, que gera o custo de aquisição  $C_{aq}$ . Cada componente tem seu custo operacional  $C_{op}$ , função do regime (ativo ou reserva) e proporcional ao tempo de operação. Por fim, há ainda os custos relativos às manutenções, sejam elas corretivas ou preventivas, que são os custos  $C_{mc}$  e  $C_{mp}$ , respectivamente, e o custo dos testes  $C_T$ .

No cálculo do custo com manutenção corretiva, deve-se levar em conta o tempo que o componente fica indisponível, excetuando-se os intervalos para manutenção preventiva. Haverá manutenção corretiva, ainda, no caso do componente estar em reserva e, após uma intervenção, ser constada alguma falha. Considerando que a taxa de reparo,  $v$ , é constante, o tempo médio para reparo é igual a  $1/v$ .

Os diferentes componentes apresentam distinções quanto ao cálculo de custos, sejam eles já existentes ou que devam ser adquiridos, estejam ora em operação ora em reserva ou simplesmente estejam sempre em reserva. De um modo geral, adaptando-se de acordo com as particularidades de cada componente, os custos totais por componente,  $C_T$ , são dados por

$$C_T = C_{aq} + C'_{op} \cdot T_{f,o} \cdot A_o^*(T_{f,o}) + C_{mp} \cdot n_{mp} + C'_{mc} \cdot \left( T_{f,o} \cdot (1 - A_o^*(T_{f,o})) - \tau_{mp} \cdot n_{mp} + \frac{1}{v} \cdot \sum_{i=1}^n P_{\tilde{A},i} \right), \quad (2.41)$$

onde  $C'_{op}$  é o custo operacional por unidade de tempo,  $T_{f,o}$  é a parcela de  $T_f$  em que o componente é operacional,  $A_o^*(T_{f,o})$  é a disponibilidade média relativa a  $T_{f,o}$ ,  $n_{mp}$  é o número de manutenções preventivas realizadas,  $C'_{mc}$  é o custo com manutenção corretiva por unidade de tempo,  $\tau_{mp}$  é o intervalo de tempo empregado por manutenção preventiva,  $v$  é a taxa de reparo constante e  $P_{\tilde{A},i}$  é a probabilidade do componente, permanecendo em reserva após sofrer manutenção ou teste, estar indisponível após essa  $i$ -ésima intervenção.

#### 2.4.2. Custos de sistema

Os custos totais relativos a um sistema são compostos pela soma dos custos de cada um dos componentes que o integram acrescidos de um possível lucro cessante,  $LC$ , originado pela indisponibilidade do sistema. O equacionamento dos custos deve estar de acordo com as características de cada sistema e, em linhas gerais, pode ser expresso por

$$C_{T,SIS} = \sum_i CT_i + LC, \quad (2.42)$$

onde  $CT_i$  é o custo total do  $i$ -ésimo componente.

### 2.5. Função de Avaliação

A função pela qual o desempenho do sistema é avaliado deve contemplar, além da disponibilidade, o rendimento que se obtém com a operação do sistema, os custos totais envolvidos e a possibilidade de haver lucro cessante devido à indisponibilidade do sistema. Todos esses fatores devem ser ponderados de forma equilibrada, de acordo com as prioridades inerentes a cada sistema.

A Eq.2.43 apresenta uma proposta generalizada para a função de avaliação:

$$F_{obj} = k_1 \cdot f_1(\text{rendimento, disponibilidade}) + k_2 \cdot f_2(\text{custos}) + k_3 \cdot f_3(\text{disponibilidade, custos}) . \quad (2.43)$$

O primeiro termo,  $f_1$ , relaciona o rendimento operacional do sistema com sua disponibilidade, considerando que somente se obtém algum ganho quando o sistema está disponível. O segundo termo,  $f_2$ , associa todos os custos envolvidos com o projeto e a operação do sistema, incluindo a possibilidade de haver lucro cessante devido à indisponibilidade do sistema. Finalmente, o terceiro termo,  $f_3$ , permite estabelecer uma relação direta ponderada entre disponibilidade e custos. Os coeficientes  $k_i$ s permitem ponderar esses termos em função das prioridades impostas no processo de otimização.

A estrutura proposta para a função de avaliação é propositalmente generalista, permitindo maior flexibilidade para adaptação às peculiaridades de cada sistema e à abordagem desejada no processo de otimização. A forma e o peso que cada termo terá na função de avaliação serão atribuídos de acordo com as especificidades e demandas de cada sistemas e, em situações reais, podem ser determinadas de acordo com a opinião de especialistas. Por exemplo, na otimização de um sistema de segurança, em geral há a necessidade de se dar um maior enfoque à disponibilidade, e, assim, um peso maior pode ser atribuído a esse fator.

## **2.6. Algoritmo Genético**

A modelagem dos sistemas revela uma considerável complexidade na relação entre escolha da configuração final, alocação de redundância, cálculo de confiabilidade e política de manutenção. O processo de otimização, ao tratar a interação de tais fatores, busca, na verdade, soluções ótimas considerando maximização da disponibilidade e minimização de custos, metas de um modo geral antagônicas. Além das equações, que traduzem funções contínuas por partes e devem ser solucionadas para cada configuração adotada, deve-se destacar que o problema de otimização envolve variáveis discretas, como a escolha de componentes a partir de uma lista ou a determinação dos instantes para se iniciar uma manutenção preventiva ou teste.

A soma desses fatores gera uma intrincada correlação cuja complexidade torna inviável um tratamento analítico convencional. Diante desse quadro, optou-se pela utilização de um algoritmo genético (AG), método que tem se revelado uma poderosa ferramenta na aplicação a problemas de otimização.

O algoritmo genético será responsável por indicar, para cada componente, o valor dos seguintes parâmetros:

1º- *Modelo do componente*: escolha a partir de uma lista de opções. O valor 1 significa escolha do primeiro da lista, 2, do segundo, e assim por diante. O valor zero significa que o componente não será incluído na configuração final do sistema.

2º- *Plano de manutenções preventivas/testes*: opção da forma a ser adotada para a distribuição dos instantes de intervenções, para cada componente do sistema. Por exemplo, o valor 1 pode indicar distribuição proporcional, 2, exponencial etc.

3º- *Número de manutenções preventivas/testes*: determinado, também, individualmente para cada componente do sistema. O valor zero significa que o componente não sofrerá intervenção.

4º- *Parâmetro  $\beta$* : definido de acordo com a distribuição dos instantes de intervenção. Caso seja proporcional,  $\beta$  é o fator de proporcionalidade; caso seja exponencial,  $\beta$  é o expoente; caso seja limite de disponibilidade,  $\beta$  é o próprio limite.

5º- *Deslocamento da grade de manutenção*: para cada componente, permite antecipar ou postergar o planejamento de intervenções. Dessa forma, pode-se evitar coincidências indesejáveis entre as intervenções de componentes e subsistemas. Por exemplo, um valor igual a  $-1$  antecipa todas as manutenções de um componente em um determinado período de tempo em relação ao previsto pela distribuição; um valor igual a  $0$  mantém os instantes; um valor igual a  $1$  adia as manutenções em um determinado período de tempo em relação ao previsto.

Tal conjunto de parâmetros denomina-se, metaforicamente, fenótipo e representa um candidato à solução. No AG, entretanto, o candidato à solução é codificado em uma estrutura denominada genótipo. Uma das possibilidades de codificação é a utilização de uma superestrutura, onde cada componente do sistema possui os cinco parâmetros acima citados. A Figura 2.1 mostra a representação esquemática da estrutura de um genótipo deste tipo.

Entretanto, o genótipo pode ser simplificado, por exemplo, quando componentes redundantes possuem características idênticas ou quando um ou mais parâmetros, devido a questões práticas, são previamente estabelecidos. Enfatiza-se, porém, que a codificação simplificada deve traduzir-se em um candidato à solução idêntico ao que poderia ser codificado pela superestrutura. Um exemplo de aplicação de um genótipo simplificado será visto em um caso prático de modificação de projeto apresentado no

Capítulo 5. Tal simplificação diminui o tamanho do genótipo, tornando possível agilizar o processo de otimização.

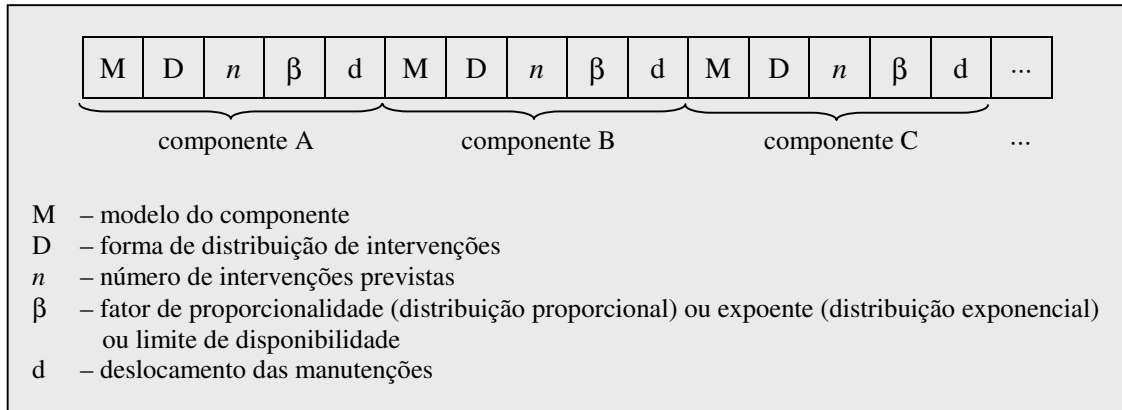


Figura 2.1. Representação esquemática do genótipo para o AG.

## Capítulo 3

### – Aplicação da Modelagem a um Sistema Hipotético –

#### 3.1. Descrição do Sistema Hipotético

Os estudos iniciais visam a aplicar o tratamento proposto para a otimização de um conjunto de possíveis configurações de um sistema hipotético. O objetivo é maximizar o ganho (ou a performance) durante o tempo de funcionamento do sistema, levando em consideração o rendimento (ou a produtividade) obtido com sua operação, os custos envolvidos e sua disponibilidade. Entende-se por rendimento do sistema o resultado esperado de sua operação normal, podendo ser medido em termos financeiros ou outro parâmetro de desempenho. O ganho, então, é o balanço entre esse rendimento e os custos inerentes ao projeto e à operação do sistema, sempre levando em conta sua disponibilidade. A configuração básica tem a forma mostrada na Figura 3.1 onde A, B e C são componentes ou subsistemas, a partir daqui denominados componentes.

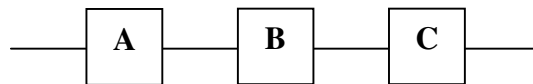


Figura 3.1. Configuração básica do sistema hipotético.

Uma segunda configuração, exposta na Figura 3.2, sugere o acréscimo de mais um componente à configuração básica com o objetivo de aumentar o rendimento do sistema, porém com o respectivo aumento de custos. Esse componente adicional entra em série com os demais na estrutura do sistema.

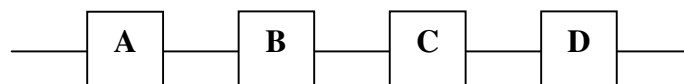


Figura 3.2. Segunda configuração do sistema hipotético.

A terceira opção proposta inclui um componente adicional à configuração básica, também com o objetivo de incrementar o rendimento. Esse componente funciona como um componente periférico e não entra em série com os demais na estrutura do sistema. Dessa forma, sua falha não causa a falha do sistema, mas apenas torna à situação original, sem o componente adicional. Essa configuração tem a forma apresentada na Figura 3.3.

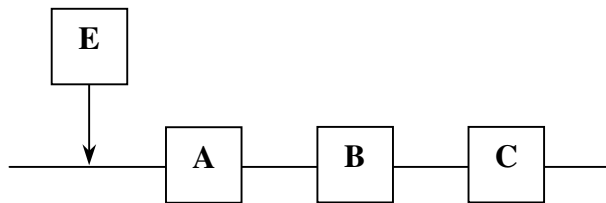


Figura 3.3. Terceira configuração do sistema hipotético.

Iniciando pela modelagem de cada componente individualmente, poderá ser feito o equacionamento da disponibilidade do sistema a partir das disponibilidades dos componentes que o integram. Os custos serão determinados em função da estrutura final do sistema, que envolverá a escolha de componentes a partir de uma lista, a alocação (ou não) de redundância e a política de manutenção adotada. A estrutura final adotada pode ser considerada como um subconjunto de uma estrutura mais complexa, conforme mostra a Figura 3.4. Essa estrutura é formada pela superposição das configurações apresentadas e será aqui denominada de configuração global.

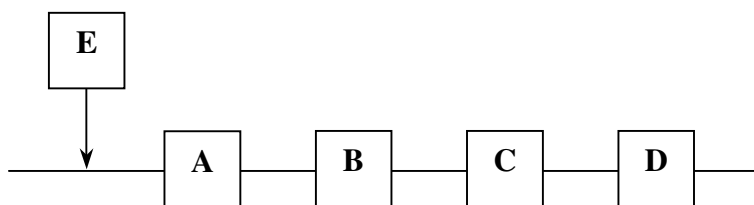


Figura 3.4. Configuração global do sistema hipotético.

Tomando por base as opções de configuração, serão feitas as considerações pertinentes e a busca da formulação que permitirá o cálculo da disponibilidade do

sistema. Em primeiro lugar, admite-se que cada componente tem a possibilidade de contar com um correspondente redundante, implicando em redundância no nível de componente (*low level*). O conjunto formado pelo componente ativo e pelo redundante será chamado subsistema. A Figura 3.5 exibe a configuração global com as respectivas possibilidades de redundância para cada componente. O equacionamento desenvolvido a seguir se aplicará a qualquer dos subsistemas.

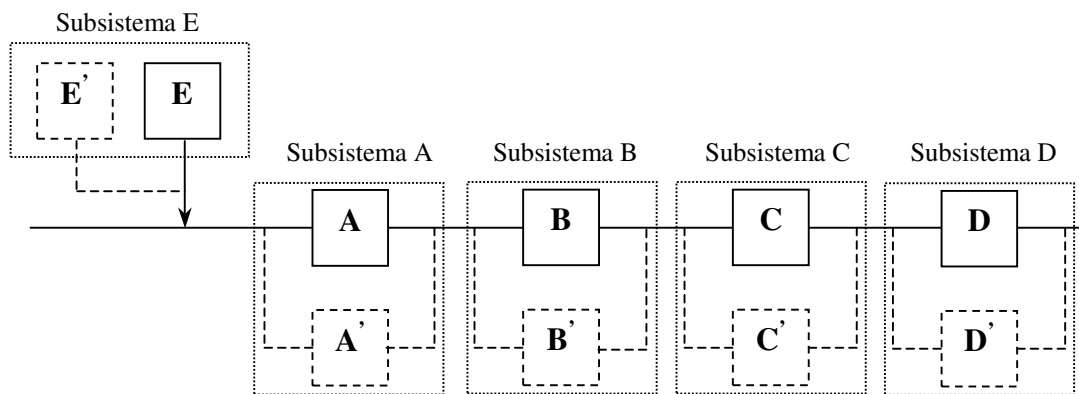


Figura 3.5. Configuração global do sistema hipotético com previsão de redundâncias.

Quanto à redundância, são feitas as seguintes considerações:

- (i) Os componentes redundantes não são necessariamente iguais aos ativos.
- (ii) Os componentes redundantes estão em reserva a frio, isto é, permanecem inativos e só entram em operação quando o respectivo componente ativo falha.
- (iii) As taxas de falha para um componente quando está inativo podem ser diferentes daquelas quando está ativo.
- (iv) A probabilidade de falha no chaveamento do componente ativo para o redundante (reserva) é desprezível.

Em relação ao sistema como um todo, falhas de causa comum não serão tratadas explicitamente. Uma falha desse tipo pode ser abordada considerando-a como um “componente” em série com os componentes ou subsistemas que estão sujeitos a ela. Ainda em relação às falhas, como a indisponibilidade de um subsistema torna todo o sistema indisponível (exceto o subsistema *E*, mas cuja falha admitiu-se não interferir no desempenho individual dos demais subsistemas) não foi considerada interdependência



entre as taxas de falha dos subsistemas. Porém, as taxas de falha dos componentes redundantes são dependentes das disponibilidades dos componentes ativos, de acordo com as equações desenvolvidas no Capítulo 2. Os componentes ativos serão submetidos a manutenções preventivas e corretivas, enquanto os componentes reservas estarão sujeitos a testes periódicos e receberão manutenção corretiva quando nesses testes for detectada alguma falha. Considera-se que não há manutenção imperfeita.

## 3.2. Disponibilidade

### 3.2.1. Disponibilidade do componente ativo

A disponibilidade do componente ativo é dada pelas Eqs.2.13, 2.19 e 2.20. A disponibilidade média, durante o tempo de operação do sistema, é calculada utilizando a Eq.2.21.

### 3.2.2. Disponibilidade do componente redundante

No sistema hipotético, se ocorrer a falha do componente ativo, entra em operação o componente em reserva. Nesta condição, caso este último venha também a falhar, ocorre falha do subsistema. Supondo que a manutenção corretiva priorize o componente ativo, o componente redundante somente será mantido após o reparo do componente ativo e a disponibilização do subsistema. Pode-se, então, nas equações desenvolvidas no Capítulo 2 para cálculo da disponibilidade de componente em reserva, substituir o fator  $A_{o,i}(t_o)$  por  $R_{o,i}(t_o)$  [45,46].

Dessa forma, a disponibilidade do componente redundante até o primeiro teste,  $A_0(t)$ , é dada, então, por

$$\begin{cases} A_0(t) = R_{r,0}(t_r) \cdot R_{o,0}(t_o) , & 0 \leq t < T_1' , \\ A_0(t) = 0 , & T_1' \leq t < T_1 . \end{cases} \quad (3.1)$$

Generalizando para o  $i$ -ésimo termo,  $A_i(t)$ , tem-se

$$\begin{cases} A_i(t) = R_{r,i}(t_r) \cdot R_{o,i}(t_o) \cdot \left\{ 1 - P_{\bar{A},i} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_i)] \right\}, & T_i \leq t < T'_{i+1}, \\ A_i(t) = 0, & T'_{i+1} \leq t < T_{i+1}, \end{cases} \quad (3.2)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , sendo  $n$  o número de testes realizados. Por fim, o último termo é dado por

$$A_n(t) = R_{r,n}(t_r) \cdot R_{o,n}(t_o) \cdot \left\{ 1 - P_{\bar{A},n} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_n)] \right\}, \quad T_n \leq t \leq T_f, \quad (3.3)$$

onde  $T_f$  é o tempo de operação do sistema.

A disponibilidade média para o componente redundante é dada também pela Eq.2.21.

### 3.2.3. Disponibilidade do subsistema

Para que o subsistema esteja disponível, é necessário apenas que pelo menos um de seus componentes esteja em condições de funcionamento, ou, em outras palavras, o subsistema estará indisponível somente quando todos seus componentes falharem. A disponibilidade do subsistema,  $A_{SS}$ , pode ser expressa em função das disponibilidades de seus componente ativo,  $A_{at}$ , e redundante,  $A_{red}$ , como

$$A_{SS} = 1 - (1 - A_{at})(1 - A_{red}). \quad (3.4)$$

Obviamente, caso não haja componente redundante, a disponibilidade do subsistema será a disponibilidade do componente ativo.

### 3.2.4. Disponibilidade do sistema

O sistema é composto por subsistemas em série, o que significa que o sistema estará operando somente se todos os subsistemas estiverem disponíveis. Para o caso da

configuração global, dada pela Figura 3.5, a disponibilidade do sistema,  $A_{SIS}$ , é expressa em função das disponibilidades dos subsistemas A, B, C e D, respectivamente  $A_A$ ,  $A_B$ ,  $A_C$ , e  $A_D$ , conforme a equação

$$A_{SIS} = A_A \cdot A_B \cdot A_C \cdot A_D \quad . \quad (3.5)$$

Da mesma forma que foi definida para o componente, a disponibilidade média do sistema,  $A_{SIS}^*(T_f)$ , é dada por

$$A_{SIS}^*(T_f) = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} A_{SIS}(t) dt \quad . \quad (3.6)$$

### 3.3. Custos

Os custos totais relacionados à operação do sistema correspondem à soma dos custos de seus componentes. A modelagem dos custos para os componentes é dada a seguir, com base no modelo descrito pela Eq.2.41, adaptada aos respectivos regimes de funcionamento a que estarão submetidos (ativo ou reserva).

#### 3.3.1. Custos de um componente ativo

O total de custos referentes ao componente ativo de um subsistema é composto basicamente por quatro parcelas: custo de aquisição, custo operacional, custo com manutenção preventiva e custo com manutenção corretiva. No cálculo do custo com manutenção corretiva, deve-se levar em conta o tempo que o componente fica indisponível, excetuando-se os intervalos para manutenção preventiva.

O custo total,  $C_T$ , pode ser modelado como

$$C_T = C_{aq} + C'_{op} \cdot T_f \cdot A^*(T_f) + C_{mp} \cdot n_{mp} + C'_{mc} \cdot \{T_f \cdot [1 - A^*(T_f)] - \tau_{mp} \cdot n_{mp}\} \quad , \quad (3.7)$$

onde  $C'_{op}$  é o custo operacional por unidade de tempo,  $n_{mp}$  é o número de manutenções preventivas realizadas,  $C'_{mc}$  é o custo com manutenção corretiva por unidade de tempo e  $\tau_{mp}$  é o intervalo de tempo empregado por manutenção preventiva, dado pela Eq.2.10.

### 3.3.2. Custos de um componente redundante

O total de custos referentes ao componente redundante de um subsistema é composto pelo custo de aquisição, pelo custo operacional e pelos custos com testes e manutenção corretiva. Para o cálculo dos custos, deve-se ressaltar dois aspectos: primeiro, o componente redundante só entra em operação após a falha do componente ativo ou quando este está em manutenção preventiva; segundo, haverá manutenção corretiva se, após um teste, for constada a falha do componente redundante.

Considerando que a taxa de reparo,  $v$ , é constante, o tempo médio para reparo é igual a  $1/v$ . O custo total pode ser expresso como

$$C_T = C_{aq} + C'_{op} \cdot T_f \cdot (1 - A_{at}^*(T_f)) \cdot A_{red}^*(T_f) + C_t \cdot n_t + C'_{mc} \cdot \frac{1}{v} \cdot \sum_{i=1}^n P_{A,i}, \quad (3.8)$$

onde  $A_{at}^*(T_f)$  e  $A_{red}^*(T_f)$  são, respectivamente, as disponibilidades médias do componente ativo e do redundante,  $n_t$  é o número de testes realizados durante o tempo de operação do sistema e  $P_{A,i}$  é a probabilidade do componente estar indisponível após o  $i$ -ésimo teste.

## 3.4. Objetivo da Otimização

O objetivo da otimização é maximizar o ganho (ou performance) obtido com a operação do sistema. Três grandezas compõem o resultado final: os rendimentos gerados pela operação do sistema, os custos totais advindos dessa operação e a disponibilidade média do sistema. Tomando como base o modelo apresentado pela Eq.2.43, pode-se definir o primeiro termo da equação,  $f_1$ , de forma a levar em conta os rendimentos em função da disponibilidade do subsistema  $E$  e já relacioná-los com a

disponibilidade do sistema. Essa relação já traz embutida em si o lucro cessante devido à indisponibilidade do sistema.

Considerando o ganho como função objetivo,  $F_{obj}$ , assume-se, então, para o sistema hipotético que  $k_1 = k_2 = 1$ , o que está coerente com  $f_1$  e  $f_2$ , dadas pelas Eqs.3.9 e 3.10. Como a relação entre disponibilidade, rendimento e custos já estão expressas em  $f_1$  e  $f_2$ , assume-se que  $k_3 = 0$ .

$$k_1 \cdot f_1 = \left[ Y'_E \cdot A_E^*(T_f) + Y'(1 - A_E^*(T_f)) \right] A_{SIS}^*(T_f) \cdot T_f , \quad (3.9)$$

$$k_2 \cdot f_2 = C_{T,SIS} = - \sum_i CT_i , \quad (3.10)$$

$$k_3 \cdot f_3 = 0 , \quad (3.11)$$

e assim

$$F_{obj} = \left[ Y'_E \cdot A_E^*(T_f) + Y'(1 - A_E^*(T_f)) \right] A_{SIS}^*(T_f) \cdot T_f - C_{T,SIS} , \quad (3.12)$$

onde:  $Y'_E$  é o rendimento do sistema, por unidade de tempo, obtido quando o subsistema  $E$  está operando;  $Y'$  é o rendimento do sistema, por unidade de tempo, obtido quando o subsistema  $E$  está indisponível;  $A_E^*(T_f)$  é a disponibilidade média do subsistema  $E$ ;  $A_{SIS}^*(T_f)$  é dada pela Eq.3.6;  $C_{T,SIS}$  são os custos totais do sistema que correspondem à soma dos custos totais de cada componente, dados pelas Eq.3.7 e Eq.3.8. É importante esclarecer que a função objetivo pode ser definida de maneiras diferentes, em função da necessidade de se dar maior importância a determinadas variáveis ou por alguma opção de projeto.

### 3.5. Algoritmo Genético

A estrutura do genótipo utilizado na otimização do sistema hipotético segue o modelo apresentado na Figura 2.1. Considerando que não há nenhuma restrição quanto

a possíveis coincidências entre instantes de intervenções, por hipótese assume-se que o deslocamento de intervenções não será considerado na otimização do planejamento de manutenções e testes do sistema hipotético.

O algoritmo genético será responsável por indicar, para cada subsistema, o valor dos seguintes parâmetros:

1º- *Modelo do componente ativo*: escolha a partir de uma lista de opções. O valor 1 significa escolha do primeiro da lista, 2, do segundo, e 3, do terceiro.

2º- *Presença de redundância e modelo do componente reserva*: escolha a partir de uma lista de opções, da mesma forma que o componente ativo. O valor zero significa que não haverá redundância.

3º- *Plano de manutenções preventivas/testes*: opção da forma a ser adotada para a distribuição dos instantes de intervenções, para ambos os componentes do subsistema. Por exemplo, o valor 1 pode indicar distribuição proporcional, 2, exponencial etc.

4º- *Número de manutenções preventivas/testes*: determinado, também, para ambos os componentes do subsistema. O valor zero significa que não haverá intervenção.

5º- *Parâmetro  $\beta$* : definido de acordo com a distribuição dos instantes de intervenção. Caso seja proporcional,  $\beta$  é o fator de proporcionalidade; caso seja exponencial,  $\beta$  é o expoente.

A Figura 3.6 mostra a representação esquemática da estrutura do genótipo:

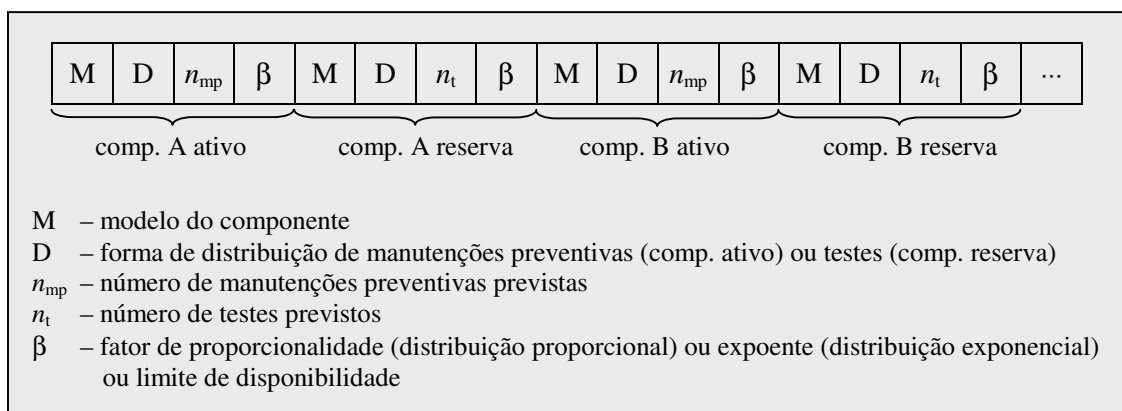


Figura 3.6. Representação esquemática do genótipo para o sistema hipotético.

## Capítulo 4

### – Otimização Integrada do Sistema Hipotético –

#### 4.1. Introdução

Nesse capítulo é realizado um estudo preliminar como o objetivo de avaliar o desempenho do modelo proposto em relação à sua capacidade de descrever o problema de otimização. Os parâmetros aqui apresentados tiveram seus valores atribuídos arbitrariamente, mas de acordo com uma lógica que assegura que sejam consistentes, isto é, rendimentos e custos em geral guardam entre si ordens de grandeza compatíveis. De um modo geral, procurou-se definir a arquitetura do problema de otimização da mesma forma que se faria em uma situação real, onde a modelagem deverá ter flexibilidade para descrevê-la com o máximo de precisão e realismo possíveis.

A seguir serão primeiramente mostrados os dados de entrada que compõem o problema, indicando as hipóteses assumidas. Posteriormente, os resultados obtidos no processo de otimização serão apresentados e avaliados.

#### 4.2. Dados de Entrada

O primeiro objeto de definição é o tempo de operação do sistema, para o qual arbitrou-se um horizonte de dez anos, isto é,  $T_f = 10$  anos. Quanto aos tempos necessários para manutenção preventiva e testes, foi escolhido, para ambos, um intervalo de três dias, ou seja,  $\tau_{mp} = \tau_t = 3$  dias, ao fim de cada mês escolhido.

Os dados referentes aos parâmetros de desempenho e características dos componentes são apresentados na Tabela 4.1, para regime de operação, e na Tabela 4.2, para regime de reserva, onde: os índices numéricos identificam o componente em uma lista, por exemplo,  $A_1$  é a primeira opção para o componente A,  $A_2$  é a segunda etc;  $\theta$  e  $m$  são, nessa ordem, os parâmetros de escala e de forma da distribuição Weibull; os índices  $a$ ,  $b$  e  $c$  estão associados a falhas prematuras, randômicas e por envelhecimento, respectivamente;  $\nu$ , taxa de reparo, e  $\alpha$ , fator de condicionamento, são constantes; o regime de operação é identificado pelo índice  $op$  e o de reserva pelo índice  $res$ .

Tabela 4.1. Dados característicos dos componentes em regime de operação. Unidade dos valores:  $[\theta] \equiv \text{ano}$ ,  $[v] \equiv \text{ano}^{-1}$ , m e  $\alpha$  adimensionais.

	$\theta_{a,op}$	$\theta_{b,op}$	$\theta_{c,op}$	$m_{a,op}$	$m_{b,op}$	$m_{c,op}$	$v_{op}$	$\alpha_{op}$
A <sub>1</sub>	2,5	3,6	4,2	0,90	1,00	3,00	12,0	9,70E-01
A <sub>2</sub>	2,3	4,1	4,7	0,85	1,00	2,70	13,0	9,75E-01
A <sub>3</sub>	2,8	4,4	5,1	0,80	1,00	2,50	13,9	9,80E-01
B <sub>1</sub>	1,6	2,0	2,4	0,88	1,00	2,90	17,2	9,40E-01
B <sub>2</sub>	2,1	2,5	3,2	0,85	1,00	2,70	20,8	9,50E-01
B <sub>3</sub>	2,4	3,0	3,6	0,82	1,00	2,30	19,7	9,60E-01
C <sub>1</sub>	22,4	30,1	31,2	0,62	1,00	1,46	18,1	9,40E-01
C <sub>2</sub>	25,0	34,0	37,0	0,55	1,00	1,50	19,5	9,60E-01
C <sub>3</sub>	28,4	37,9	40,5	0,49	1,00	1,74	20,7	9,70E-01
D <sub>1</sub>	3,1	4,2	5,7	0,74	1,00	3,20	36,0	9,80E-01
D <sub>2</sub>	3,4	5,8	6,5	0,72	1,00	2,78	39,2	9,78E-01
D <sub>3</sub>	3,6	6,0	7,0	0,69	1,00	2,55	41,6	9,60E-01
E <sub>1</sub>	31,0	44,0	53,0	0,78	1,00	3,10	56,0	9,70E-01
E <sub>2</sub>	45,0	52,0	62,0	0,79	1,00	2,70	59,0	9,81E-01
E <sub>3</sub>	53,0	67,0	74,0	0,82	1,00	2,55	64,0	9,90E-01

Tabela 4.2. Dados característicos dos componentes em regime de reserva. Unidade dos valores:  $[\theta] \equiv \text{ano}$ ,  $[v] \equiv \text{ano}^{-1}$ , m e  $\alpha$  adimensionais.

	$\theta_{a,res}$	$\theta_{b,res}$	$\theta_{c,res}$	$m_{a,res}$	$m_{b,res}$	$m_{c,res}$	$v_{res}$	$\alpha_{res}$
A <sub>1</sub>	7,5	10,2	13,1	0,90	1,00	3,00	10,3	9,85E-01
A <sub>2</sub>	6,9	12,1	13,7	0,85	1,00	2,70	11,7	9,88E-01
A <sub>3</sub>	8,1	13,6	14,7	0,80	1,00	2,50	12,1	9,90E-01
B <sub>1</sub>	4,8	6,1	8,4	0,92	1,00	3,10	15,4	9,45E-01
B <sub>2</sub>	6,3	7,6	9,4	0,85	1,00	2,70	18,6	9,58E-01
B <sub>3</sub>	7,2	9,1	10,2	0,75	1,00	1,90	17,8	9,82E-01
C <sub>1</sub>	90,5	102,0	114,3	0,90	1,00	1,60	15,4	9,70E-01
C <sub>2</sub>	96,7	123,0	132,1	0,85	1,00	1,52	16,9	9,80E-01
C <sub>3</sub>	101,2	134,6	140,3	0,75	1,00	0,96	17,3	9,85E-01
D <sub>1</sub>	15,5	20,7	24,1	0,90	1,00	3,00	17,2	9,88E-01
D <sub>2</sub>	16,2	25,3	30,7	0,85	1,00	2,70	19,4	9,90E-01
D <sub>3</sub>	19,4	28,1	35,2	0,80	1,00	2,50	20,1	9,60E-01
E <sub>1</sub>	98,0	117,0	154,0	0,90	1,00	2,20	32,0	9,90E-01
E <sub>2</sub>	129,0	139,0	162,0	0,92	1,00	2,35	36,5	9,95E-01
E <sub>3</sub>	144,0	164,0	179,0	0,94	1,00	2,48	41,0	9,98E-01



A Tabela 4.3 apresenta todos os custos relativos aos componentes, a saber, custos de aquisição, operação, manutenção preventiva, manutenção corretiva e teste, baseados em um valor monetário, \$, arbitrário.

Tabela 4.3. Custos relativos aos componentes.

	<b>aquisição (\$)</b>	<b>operação (\$/ano)</b>	<b>mnt prev (\$/mnt)</b>	<b>mnt corr (\$/ano)</b>	<b>teste (\$/teste)</b>
A <sub>1</sub>	60,00	14,00	0,60	60,00	0,55
A <sub>2</sub>	70,00	16,00	0,65	75,00	0,57
A <sub>3</sub>	80,00	17,00	0,75	79,00	0,62
B <sub>1</sub>	55,00	6,20	1,20	72,00	0,95
B <sub>2</sub>	70,00	7,40	1,50	94,00	1,20
B <sub>3</sub>	75,00	8,00	1,70	103,00	1,25
C <sub>1</sub>	112,00	7,00	1,34	55,00	1,04
C <sub>2</sub>	120,00	9,00	1,69	62,00	1,09
C <sub>3</sub>	140,00	10,20	1,95	68,00	1,12
D <sub>1</sub>	63,00	7,50	0,50	52,00	0,42
D <sub>2</sub>	70,00	7,80	0,60	61,00	0,49
D <sub>3</sub>	75,00	8,20	0,75	65,00	0,57
E <sub>1</sub>	48,00	4,20	1,02	56,40	0,95
E <sub>2</sub>	52,00	4,40	1,26	61,00	1,01
E <sub>3</sub>	55,00	5,10	1,54	65,30	1,09

Finalmente, na Tabela 4.4 estão mostradas as expectativas de rendimentos anuais para cada configuração do sistema, apresentadas no Capítulo 3, também baseados no valor monetário \$.

Tabela 4.4. Expectativa de rendimentos gerados pela operação dos sistemas.

<b>Configuração</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Rendimento (\$/ano)</b>
1 <sup>a</sup>	ABC	250,00
2 <sup>a</sup>	ABCD	270,00
3 <sup>a</sup>	ABCE	275,00
4 <sup>a</sup>	ABCDE	297,00

### 4.3. Resultados Obtidos

Para o tratamento do problema de otimização foi construída uma planilha utilizando o software Microsoft® Excel 2000 tendo como suplemento o software GeneHunter™ [51] para execução do algoritmo genético. Foi realizada uma busca exaustiva por soluções ótimas tendo como objetivo a maximização do ganho, expresso pela Eq.3.12. Os resultados da solução que apresentou o maior valor para  $F_{obj}$  estão na Tabela 4.5. A Tabela 4.6 relaciona os componentes para cada subsistema, selecionados da lista de opções apresentada, que compõem a configuração adotada para o sistema.

Tabela 4.5. Valores das grandezas para a solução de máximo valor de  $F_{obj}$ .

$F_{obj}$ (\$)	$A_{SIS}^*$ ( $T_f$ )	$C_{T,SIS}$ (\$)	$C_{A,SIS}$ (\$)
<b>1811,67</b>	0,9544	1022,55	475,00

Tabela 4.6. Componentes selecionados para a configuração do sistema.

	Subsistema A	Subsistema B	Subsistema C	Subsistema D	Subsistema E
<b>Ativo</b>	A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>
<b>Reserva</b>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	–	–	–

A Figura 4.1 mostra esquematicamente a configuração do sistema baseada nos resultados da melhor solução.

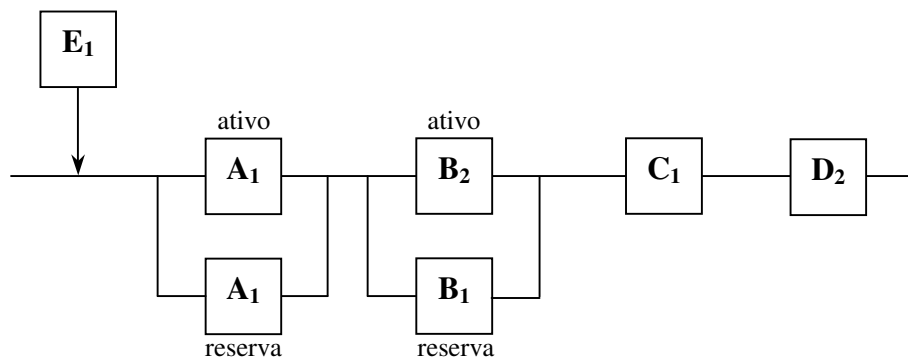


Figura 4.1. Configuração final do sistema hipotético de acordo com a melhor solução.

A Tabela 4.7 lista, para os componentes selecionados, os parâmetros relacionados a manutenções preventivas e a testes, a saber: a forma de distribuição ( $D$ ), o número de manutenções preventivas ( $n_{mp}$ ), o número de testes ( $n_t$ ), e o fator de distribuição ( $\beta$ ).

Tabela 4.7. Parâmetros relacionados a intervenções para os componentes selecionados para compor o sistema.

	<b>A ativo</b>	<b>A reserva</b>	<b>B ativo</b>	<b>B reserva</b>	<b>C ativo</b>	<b>D ativo</b>	<b>E ativo</b>
<b>D</b>	Proporcional	*	Proporcional	*	**	*	**
$n_{mp}$	4	—	4	—	—	1	—
$n_t$	—	14	—	9	—	—	—
$\beta$	0,96	1,00	0,96	1,00	—	1,00	—

\* A escolha de  $\beta = 1,00$  implica em distribuição uniforme dos testes, isto é, os intervalos entre os testes são iguais. Neste caso, embora o AG tenha escolhido distribuição proporcional (Capítulo 3), não há distinção entre as distribuições proporcional e exponencial.

\*\* Não foram previstas manutenções preventivas.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.7 prepara-se o planejamento das intervenções que serão feitas ao longo do tempo de operação do sistema. A Tabela 4.8 mostra os instantes (meses) que foram determinados para que os componentes ativos sofressem manutenção preventiva e a Tabela 4.9 mostra os instantes (meses) em que os componentes reservas devem ser submetidos a testes.

Tabela 4.8. Planejamento de manutenções preventivas, em meses, para os componentes ativos.

<b>Componente Ativo</b>	<b>Manutenção Preventiva (mês)</b>			
	<b>1<sup>a</sup></b>	<b>2<sup>a</sup></b>	<b>3<sup>a</sup></b>	<b>4<sup>a</sup></b>
A	26	51	75	98
B	26	51	75	98
D	60			

Tabela 4.9. Planejamento de testes, em meses, para os componentes reservas.

Componente Reserva	Testes (mês)													
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
A	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112
B	12	24	36	48	60	72	84	96	108					

Em relação ao subsistema A, a Figura 4.2 exibe o gráfico da disponibilidade em função do tempo para seu componente ativo, a Figura 4.3 para seu componente reserva e a Figura 4.4 para o subsistema como um todo, indicando em cada um deles a disponibilidade média ao longo do tempo de operação do sistema,  $T_f$ .

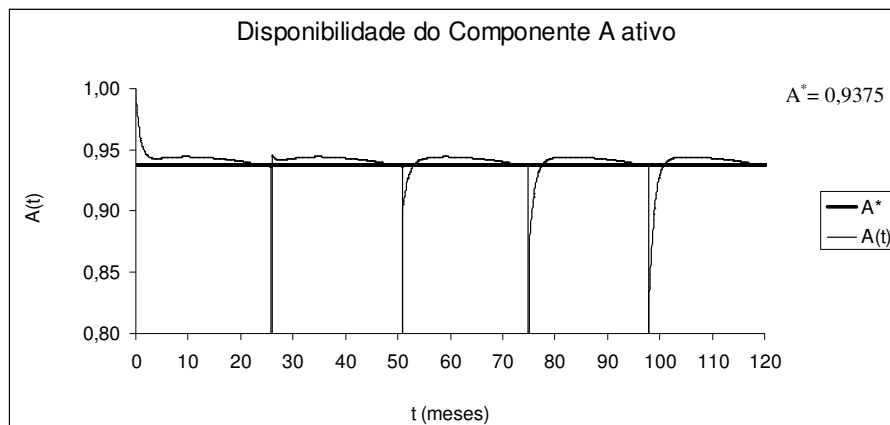


Figura 4.2. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema A.

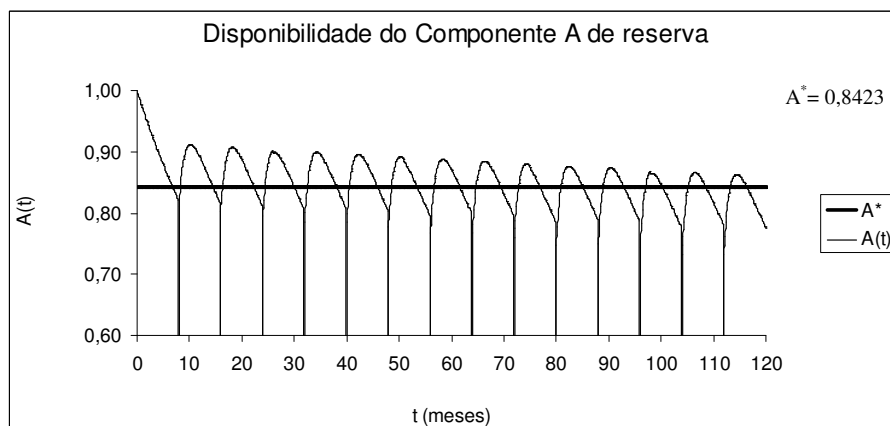


Figura 4.3. Disponibilidade versus tempo do componente reserva do subsistema A.

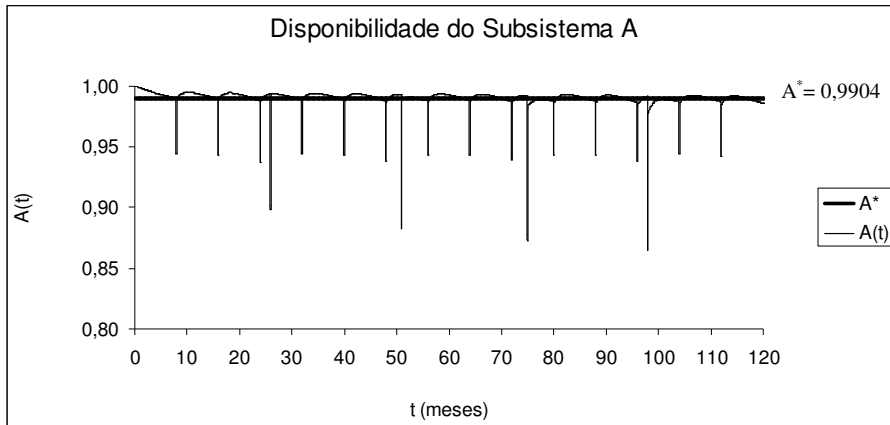


Figura 4.4. Disponibilidade versus tempo do subsistema A.

Para o subsistema B, as Figs. 4.5 a 4.7 mostram a disponibilidade em função do tempo, respectivamente, do componente ativo, do reserva e de todo o subsistema.

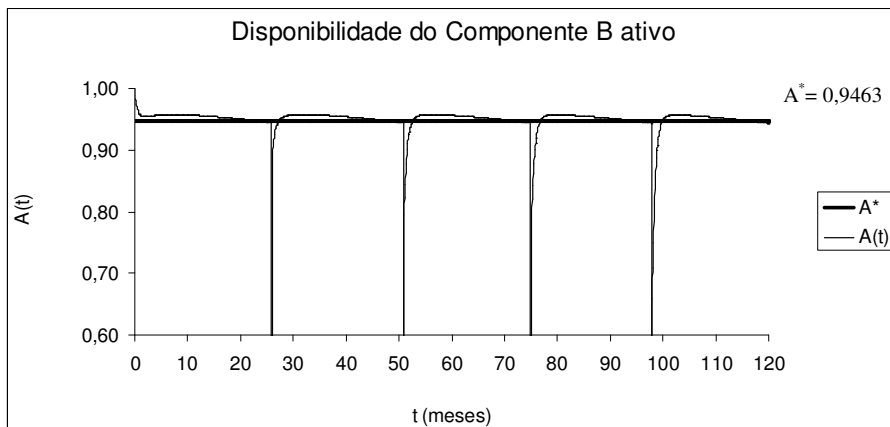


Figura 4.5. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema B.

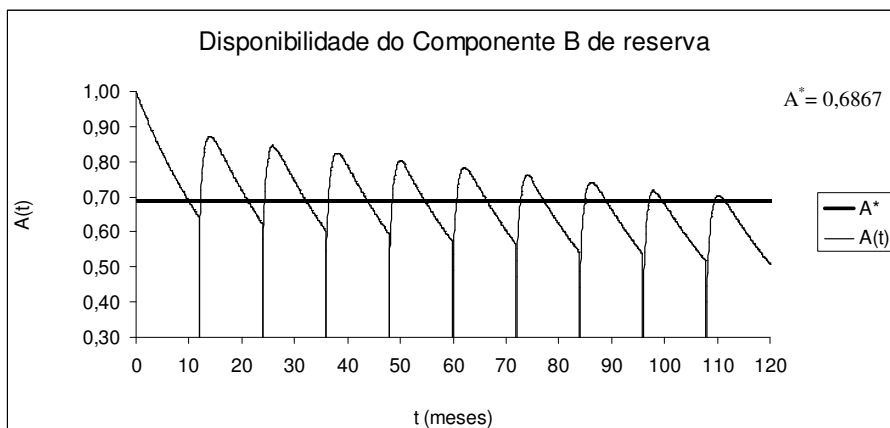


Figura 4.6. Disponibilidade versus tempo do componente reserva do subsistema B.

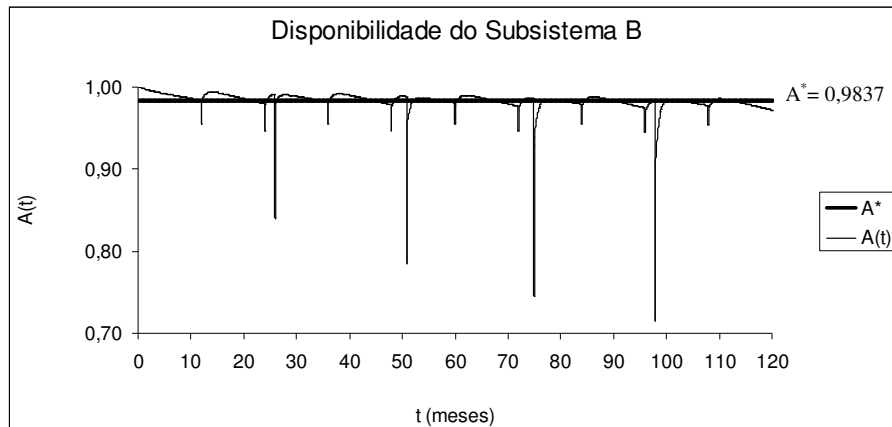


Figura 4.7. Disponibilidade versus tempo do subsistema B.

Os subsistemas C, D e E são compostos apenas pelo componente ativo, pois na configuração selecionada pelo algoritmo genético não houve previsão de alocação de redundância para esses subsistemas. As disponibilidades para esses três subsistemas são, portanto, coincidentes com as disponibilidades de seus respectivos componentes únicos.

A Figura 4.8 exhibe o comportamento da disponibilidade em função do tempo e a disponibilidade média ao longo do tempo de operação do sistema,  $T_f$ , para o componente C ativo (ou subsistema C); a Figura 4.9 exhibe o mesmo para o componente D ativo (ou subsistema D); e a Figura 4.10 o mesmo para o componente E ativo (ou subsistema E).

Finalmente, a contribuição dos subsistemas A, B e C resulta na disponibilidade do sistema, cuja disponibilidade em função do tempo e disponibilidade média ao longo de  $T_f$  são mostradas na Figura 4.11.

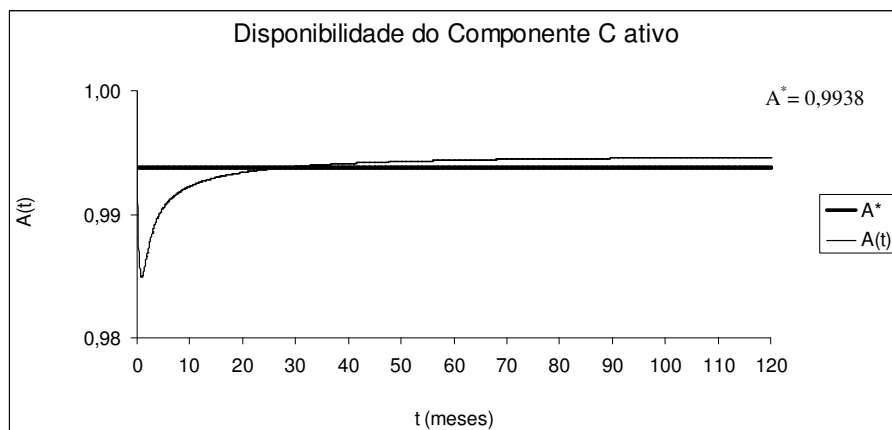


Figura 4.8. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema C.

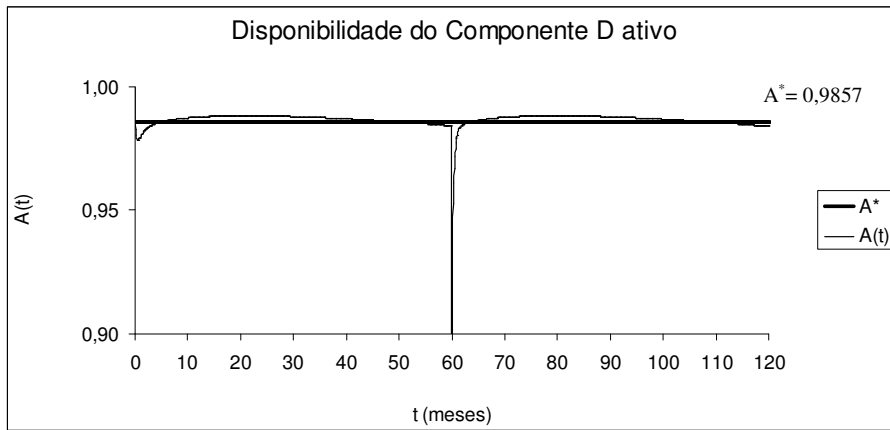


Figura 4.9. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema D.

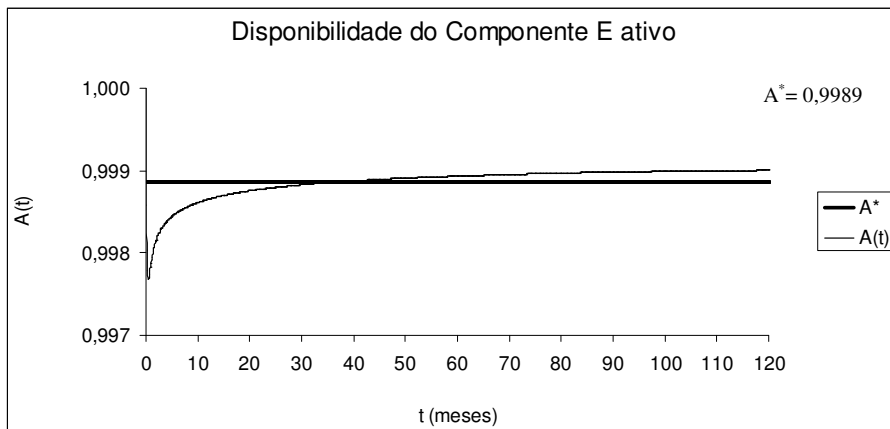


Figura 4.10. Disponibilidade versus tempo do componente ativo do subsistema E.

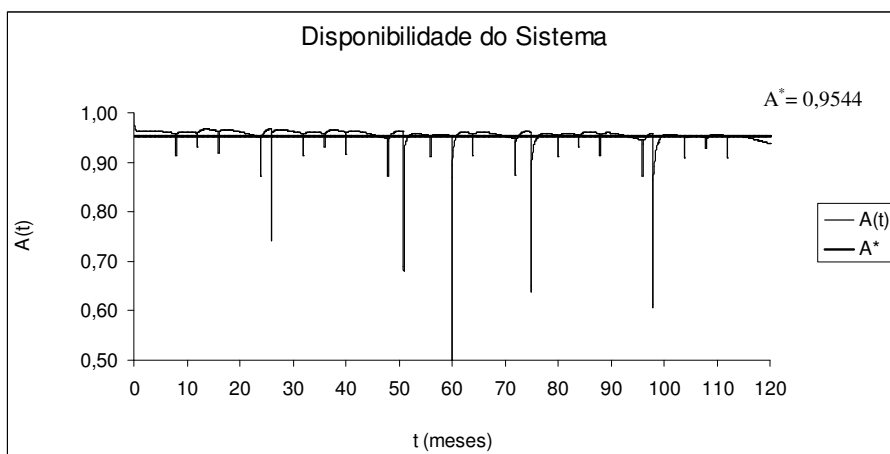


Figura 4.11. Comportamento da disponibilidade em função do tempo para o sistema hipotético.

#### 4.4. Avaliação dos Resultados

A aplicação da metodologia proposta nesse trabalho a um sistema hipotético simples mostrou-se especialmente válida para se ter um entendimento completo do processo de otimização e permitir uma avaliação precisa de seus resultados e de sua aplicabilidade. Voltando a atenção para o sistema hipotético analisado, cujos dados de entrada, como já foi dito, foram arbitrados, alguns pontos merecem ser destacados:

(a) A maior confiabilidade dos componentes C, D e E, em conjunto com suas respectivas taxas de reparo, permitiu uma alta disponibilidade média, levando a configuração final a não prever redundâncias para esses componentes.

(b) Especificamente para os componentes C e E, a alta disponibilidade média obtida faz com que a realização de manutenções preventivas seja desvantajosa, e por isso essas intervenções não foram previstas.

(c) O componente selecionado para ser o ativo do subsistema B é diferente do que foi selecionado para reserva. Isso mostra que o processo de otimização foi sensível à diferença de comportamento dos componentes em função do regime a que estão submetidos (ativo ou reserva).

(d) Os planejamentos para manutenção preventiva dos componentes ativos dos subsistemas A e B são coincidentes. A princípio, essa opção pode parecer contraproducente, pois colocaria dois componentes fora de operação ao mesmo tempo. Quando algum componente é submetido a manutenção ou teste ocorre uma queda na disponibilidade do sistema, conforme pode ser observado na Figura 4.6. Desta forma, coincidir os instantes de manutenção para os componentes ativos dos subsistemas A e B mostrou-se uma melhor solução.

(e) Para os componentes reserva dos subsistemas A e B, alguns instantes previstos para testes também são coincidentes. Esse fato pode ter a mesma explicação sugerida no item anterior, para os componentes ativos.

(f) Como o componente D não tem redundância, sua manutenção preventiva causa a indisponibilidade do sistema. Como, por hipótese, não há nenhuma restrição quanto a esse fato, a manutenção pode ser prevista, desde que contribua com a maximização do ganho.



#### 4.5. Otimização *a priori* versus Otimização *a posteriori*

Para se verificar a relevância da otimização integrada, propôs-se um estudo comparativo, simulando uma situação onde a otimização será aplicada *a posteriori*, ou seja, a uma estrutura do sistema previamente definida utilizando os dados disponíveis para as configurações e os componentes. Essa escolha da configuração do sistema baseou-se nos valores médios dos dados disponíveis para os componentes apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Para essa análise das possíveis configurações do sistema, apresentadas nas Figs.3.1 a 3.4, utilizou-se a mesma planilha de cálculo usada para a otimização integrada, porém sem previsão de redundâncias e sem planejamento de manutenções preventivas. Como a idéia é exatamente aplicar a metodologia de otimização a uma estrutura previamente estabelecida, os métodos de aumento de disponibilidade, como alocação de redundâncias e políticas de manutenção preventiva e testes, foram aplicados posteriormente. A Tabela 4.10 mostra os resultados da análise feita para as possíveis configurações do sistema.

Tabela 4.10. Análise prévia das opções de configuração do sistema.

	Configuração			
	ABC	ABCD	ABCE	ABCDE
$F_{obj}$ (\$)	<b>1230,59</b>	<b>1191,61</b>	<b>1329,57</b>	<b>1302,43</b>
$A_{SIS}^*$ ( $T_f$ )	0,7876	0,7731	0,7876	0,7731
$C_{T,SIS}$ (\$)	738,39	895,86	836,18	993,66
$C_{A,SIS}$ (\$)	260,67	330,00	312,33	381,67

Os resultados apresentados apontam para a escolha da configuração composta pelos componentes A, B, C e E, conforme Figura 3.3. Uma vez definida a estrutura, com base nos dados apresentados na Tabela 4.10, aplicou-se a ela o mesmo processo de maximização da  $F_{obj}$  utilizado na otimização integrada, através de busca exaustiva de soluções, com a única diferença de o algoritmo genético não mais escolher entre as configurações possíveis.

O melhor resultado dessa otimização, em termos da  $F_{obj}$ , é apresentado na Tabela 4.11, comparativamente ao melhor resultado obtido através da otimização integrada.

Tabela 4.11. Melhores resultados dos processos de otimização.

	<b>Otimização Integrada</b>	<b>Otimização de configuração definida</b>
$F_{obj}$ (\$)	1811,67	1795,57
$A_{SIS}^*$ ( $T_f$ )	0,9544	0,9664
$C_{T,SIS}$ (\$)	1022,55	861,78
$C_{A,SIS}$ (\$)	475,00	405,00

Para consolidar o estudo comparativo, foi realizada uma seqüência de experimentos, onde os mesmos parâmetros do AG foram utilizados na otimização integrada (*a priori*) e na otimização da configuração definida previamente (*a posteriori*). Em tais experimentos, procurou-se variar os parâmetros do AG, de forma a se verificar a consistência dos resultados obtidos pelos dois métodos e possibilitar uma comparação entre eles. Ensaio prévios demonstraram que uma população de 100 indivíduos é satisfatória, não se obtendo resultados melhores com populações maiores. Diversas sementes forma utilizadas. A taxa de recombinação (*crossover rate*) variou entre 0,6 e 0,9 e a taxa de mutação (*mutation rate*) entre 0,01 e 0,02. Aplicou-se elitismo e o critério de parada adotado foi o de permanecer 50 gerações sem apresentar melhora no resultado de avaliação (*fitness*). A Tabela 4.12 apresenta os resultados desses experimentos.

Tabela 4.12. Comparação de resultados dos processos de otimização.

<b>Experimento</b>	$F_{obj}$	
	<i>a priori</i>	<i>a posteriori</i>
01	1788,03	1713,13
02	1808,58	1768,90
03	1788,03	1713,13
04	1747,53	1768,90
05	1718,15	1713,13
06	1756,48	1729,10
07	1789,95	1729,10
08	1785,20	1765,11
09	1774,33	1759,19
10	1778,02	1725,77
<b>Média</b>	<b>1773,43</b>	<b>1738,55</b>

A comparação dos resultados nos leva a refletir sobre as vantagens de se aplicar um modelo de otimização integrada. O resultado obtido pela otimização integrada pode ser considerado melhor por três aspectos: primeiro, encontrou um valor maior para a  $F_{obj}$ , foco do processo de otimização; segundo, na média os resultados dos experimentos mostrados na Tabela 4.12 são melhores; terceiro, o conjunto de soluções obtidas pelo processo não integrado pode perfeitamente fazer parte do conjunto de soluções encontradas pela otimização integrada, isto é, o primeiro pode ser considerada um subconjunto do segundo.

Por fim, fica nítido o fato de que um processo de otimização que leva em conta todos os aspectos envolvidos com um sistema, desde sua concepção até sua política de manutenção, é capaz de encontrar soluções que poderiam deixar de ser obtidas por métodos que não contemplem essa integração. Essa vantagem, observada nesse estudo de um caso hipotético, instiga o estudo de técnicas de otimização integrada a aplicações práticas.

#### **4.6. Considerações sobre Apoio à Decisão**

O objetivo do processo de otimização foi maximizar o ganho com a operação do sistema, traduzido pela  $F_{obj}$ . Porém, em determinadas situações, pode ser vantajoso obter não uma única solução, mas um conjunto de soluções que poderão ser analisadas para se definir qual delas deve-se adotar. Esse procedimento tem como objetivo servir de apoio a uma tomada de decisão em situações sujeitas a restrições, sejam elas orçamentárias (limitação de custos) ou mesmo de segurança (disponibilidade mínima aceitável), quando tais restrições não estão previamente definidas ou podem ser modificadas posteriormente. O Apêndice A exemplifica um tratamento para diversas soluções obtidas para o sistema hipotético otimizado neste capítulo. O Apêndice B traz uma relação dessas soluções.

## Capítulo 5

### – Aplicação da Modelagem ao Sistema ASC de Angra I –

#### 5.1. Introdução

Nesta etapa do trabalho, a meta é fazer uma aplicação da modelagem a uma situação real, utilizando, de maneira abrangente, os recursos da otimização integrada, demonstrando a aplicabilidade e a relevância da utilização da técnica. É importante ressaltar que, em se tratando de uma aplicação a um sistema real, comumente não se aplica a otimização a todos os fatores envolvidos com a operação do sistema, pois alguns aspectos, tais como configuração do sistema ou modelos de componentes, podem estar previamente definidos e não serem passíveis de modificação. O modelo de otimização, portanto, deve ser adaptado para descrever com realismo o sistema a ser estudado.

Para atender aos estudos a que este trabalho se propõe, o sistema a ser analisado deve possuir as seguintes características:

- (i) ser um sistema de segurança de uma instalação nuclear;
- (ii) apresentar histórico de manutenção e informes de indisponibilidade que justifiquem a realização de estudos de otimização;
- (iii) estar preferencialmente, dentro do ciclo de vida útil, em estágio que apresente características de envelhecimento;
- (iv) permitir a contemplação do maior número possível de fatores relacionados ao projeto e à operação do sistema, possibilitando uma aplicação abrangente da otimização integrada;
- (v) haver disponibilidade de acesso às informações pertinentes ao funcionamento do sistema, aos equipamentos, aos históricos de falhas e informes de indisponibilidades, às especificações técnicas, aos requisitos de segurança, às propostas de modificação de projeto e às diversas fontes de custos.

Baseando-se nas opiniões de profissionais envolvidos com sistemas de segurança de usinas nucleares, optou-se por fazer a aplicação da otimização integrada ao Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle de Angra I, por este melhor se enquadrar nas características descritas.

## **5.2. Descrição do Sistema ASC de Angra I**

O Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle (ASC) é projetado para remover todo o calor gerado por equipamentos, iluminação e pessoal, proporcionando condições de operação segura para pessoal e equipamentos [52,53]. O objetivo é manter condições ambientais adequadas e seguras na Sala de Controle em operação normal ou em situação de emergência (acidente de perda de refrigerante e/ou “blackout”).

As bases de projeto são estabelecidas observando dois focos principais: primeiro, evitar a contaminação do ar por partículas aplicando uma pressão positiva de 2,5mmH<sub>2</sub>O no interior da Sala de Controle; segundo, manter o nível de contaminação do ar abaixo dos limites máximos admitidos pelas normas básicas de proteção radiológica da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), mantendo as doses no interior da Sala de Controle tão baixas quanto possível durante a operação normal ou em emergência. A temperatura da Sala de Controle é mantida em torno de 25°C e a umidade relativa em 50%.

Um único sistema de refrigeração é capaz de atender a demanda de ar refrigerado (100%), havendo, ainda, um sistema de mesmas dimensões em reserva para atender a critérios de confiabilidade. A capacidade do sistema assegura um mínimo de 12,1 trocas de ar por hora na Sala de Controle, cujo volume livre é de 1740 m<sup>3</sup>.

Cada Sistema de Ar Condicionado consiste de uma unidade de filtragem, evaporador, ventilador, aquecedor elétrico, condensador, compressor e instrumentação e controles associados. O exaustor é localizado no teto da Sala de Controle; os compressores e os condensadores estão localizados em compartimento fechado acima da Sala de Controle no Edifício Auxiliar Sul; os demais componentes estão localizados na sala de equipamentos.

A operação do Sistema ASC consiste dos modos de operação normal e recirculação de emergência. A Figura 5.1 apresenta um esquema simplificado do sistema.

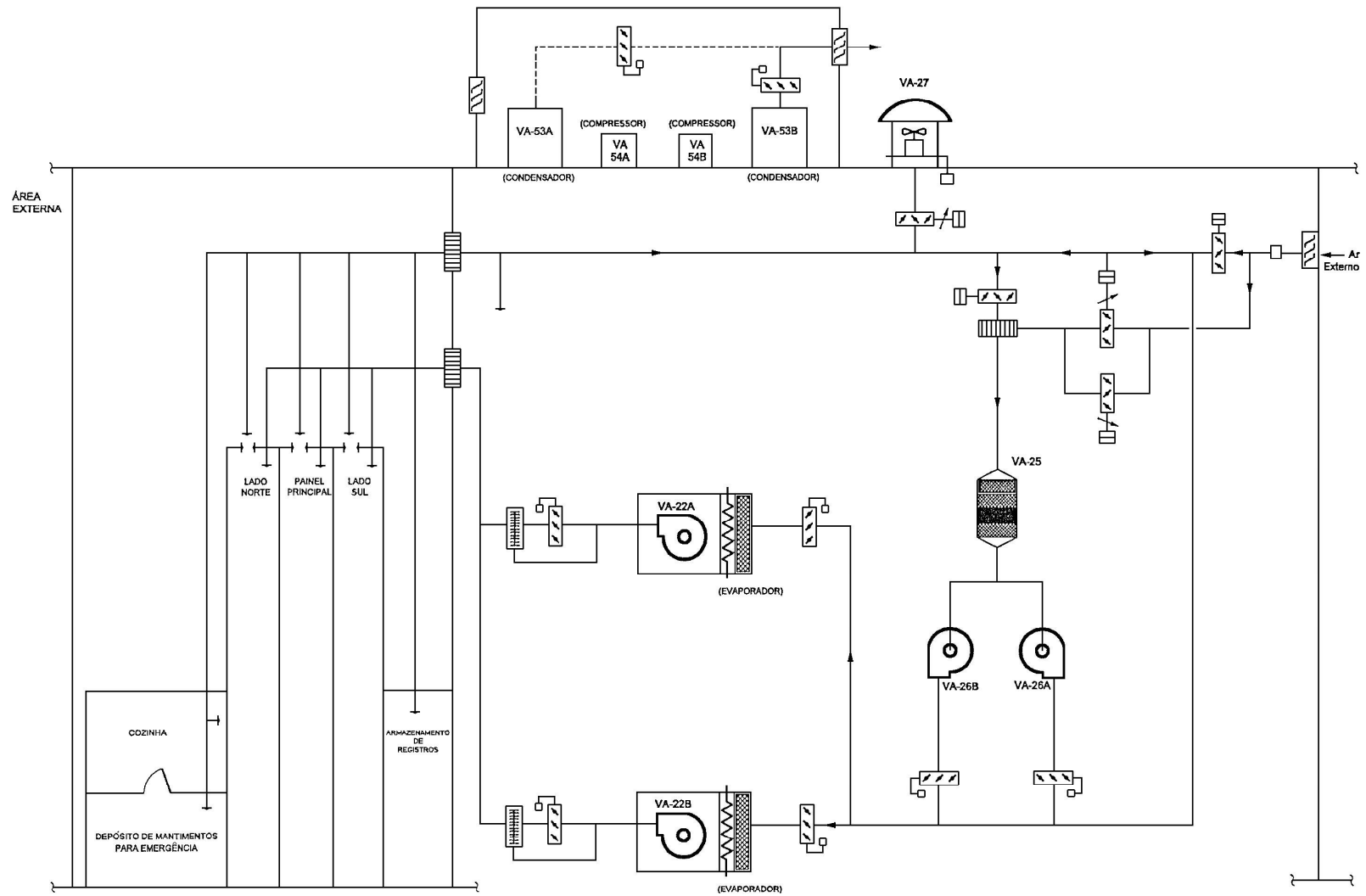


Figura 5.1. Esquema simplificado do Sistema ASC de Angra I.

No modo de operação normal, o ar é recirculado através da unidade de condicionamento de ar com admissão de ar externo devido ao consumo de oxigênio, ao controle de odor e à fuga pelas portas. O ar externo é introduzido para o sistema a uma taxa de cerca de 0,57 m<sup>3</sup>/s. O ventilador de exaustão permanece em funcionamento durante a operação normal e o Sistema de Filtragem de Emergência é isolado. Uma leve sobrepressão é mantida modulando-se o abafador de exaustão. A sobrepressão de 2,5mmH<sub>2</sub>O é considerada suficiente para evitar infiltração, porque a estrutura do prédio da Sala de Controle é hermética, com limitado número de penetrações.

O sistema se realinha para modo de emergência quando ocorre injeção de segurança, blackout ou alta radiação na sala de controle. A entrada em modo de recirculação de emergência dá-se da seguinte forma: o exaustor (VA-27) pára e o abafador de controle é fechado; o abafador de entrada para o Sistema de Filtragem de Emergência abre e permite a passagem de ar através da unidade de filtragem de emergência (VA-25); os dois ventiladores reforçadores (VA-26A/B) partem e o operador desliga o redundante manualmente; o abafador de tomada de ar externo se fecha e os abafadores de controle de pressão modulam. Todo ar externo passa, então, pela unidade de filtragem de emergência.

### **5.3. Proposta de Otimização do Sistema ASC de Angra I**

O processo de otimização integrada será aplicado a uma proposta de possíveis configurações do Sistema ASC, considerando os componentes principais e algumas modificações em relação à estrutura atual do Sistema ASC de Angra I. Os objetivos do estudo são a maximização da disponibilidade do sistema em modo de operação normal e a minimização dos custos relativos à implementação da estrutura e à operação do sistema. A probabilidade de o sistema operar em modo de emergência é baixa e não foi considerada nesse estudo. A otimização integrada deve definir uma configuração para o Sistema ASC, indicando o número de tramos funcionais/componentes para cada subsistema, e apresentar um planejamento de manutenções e testes para todo o sistema.

Os componentes considerados relevantes para o estudo são os compressores, os condensadores, os ventiladores, os evaporadores e as unidades de filtragem. As alternativas de modificações de projeto, em relação à estrutura atual do Sistema ASC de Angra I, que constituem objeto de análise são:

- (i) inclusão de mais um tramo funcional de refrigeração, semelhante aos já existentes e em paralelo com estes;
- (ii) instalação de um subsistema de refrigeração de ar baseado no Sistema de Água Gelada da usina, com o objetivo de reduzir o desgaste dos tramos funcionais de refrigeração convencionais;
- (iii) inclusão de mais uma unidade de filtragem, semelhante à já existente e em paralelo a esta;
- (iv) inclusão de mais um ventilador reforçador na saída da(s) unidade(s) de filtragem, semelhante aos já existentes e em paralelo a estes.

No modelo para a otimização, o Sistema ASC está subdividido em:

- (i) *Subsistema de água gelada* (opcional) – caso sua instalação seja prevista, pode conter de um a três tramos funcionais de refrigeração, cada tramo contendo um conjunto ventilador/serpentina. É previsto que apenas um tramo fique em operação por vez, os demais permanecem em reserva. Os tramos revezam-se mensalmente.
- (ii) *Subsistema de refrigeração* - composto por dois ou três tramos funcionais de refrigeração, cada tramo contendo um compressor, um condensador e um conjunto ventilador/evaporador. Somente entra em operação se o subsistema de água gelada estiver indisponível. O tramo que, caso seja necessário, deve entrar em operação é definido também por uma escala mensal.
- (iii) *Subsistema de filtragem* - composto por uma ou duas unidades de filtragem. Permanece em reserva, pois não atua em modo de operação normal do Sistema ASC.
- (iv) *Subsistema de ventiladores* - composto por dois ou três ventiladores reforçadores. Permanece em reserva, pois não atua em modo de operação normal do Sistema ASC.

A Figura 5.2 apresenta a configuração máxima, ou superestrutura, para o Sistema ASC, ou seja, aquela que inclui o maior número de componentes. Os componentes representados por linhas cheias correspondem aos instalados atualmente em Angra I e, representados por linhas pontilhadas, estão os componentes relativos às modificações de projeto sugeridas.



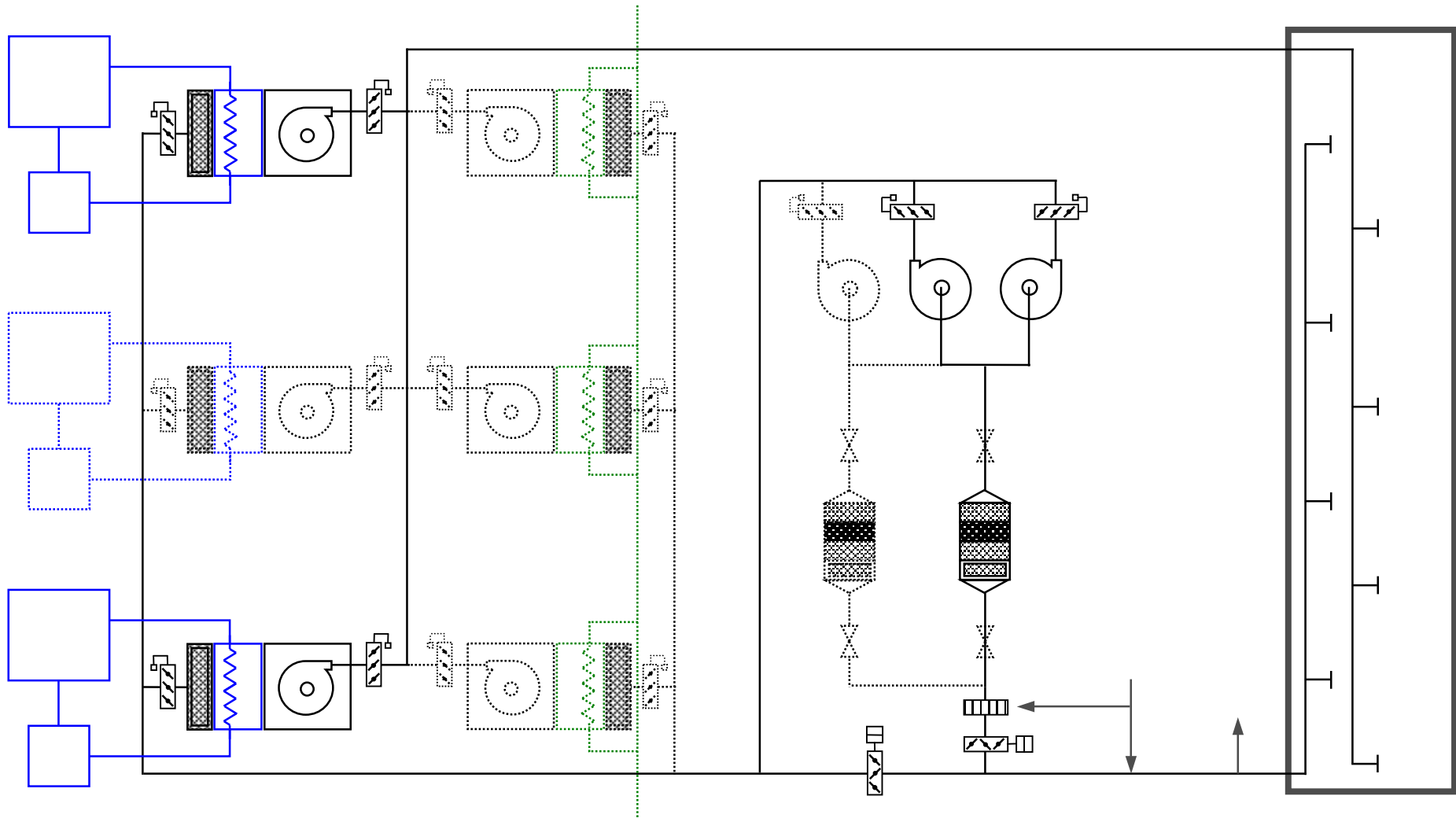


Figura 5.2. Esquema simplificado da estrutura proposta para Sistema ASC.

As soluções obtidas no processo de otimização podem apresentar configurações que vão desde a estrutura mínima – que corresponde à estrutura atual do sistema – até toda a superestrutura. Quaisquer arranjos intermediários na configuração do sistema são considerados válidos. O processo de otimização aborda de maneira integrada a determinação da estrutura, o cálculo da disponibilidade associado ao planejamento das manutenções e a estimativa de custos.

## 5.4. Disponibilidade

### 5.4.1. Disponibilidade do subsistema de refrigeração

Os componentes pertencentes a cada tramo são tratados de forma conjunta, como uma unidade. As taxas de falha têm a forma de uma distribuição de Weibull a dois parâmetros:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{m-1}. \quad (5.1)$$

Os valores dos parâmetros  $m$  e  $\theta$  são diferenciados para regime de operação e regime em reserva. A confiabilidade é dada por equações da forma

$$R(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\theta} \right)^m \right]. \quad (5.2)$$

Todos os tramos são equivalentes e se alternam mensalmente no regime de operação, isto é, a cada mês um dos tramos é selecionado para operar enquanto os demais ficam em reserva.

A disponibilidade de cada tramo durante o período de tempo analisado é dada pelas Eq.2.27, Eq.2.33 e Eq.2.34. A disponibilidade do subsistema de refrigeração,  $A_{SSR}(t)$ , é dada por:

$$A_{SSR}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_{T,i}(t)), \quad (5.3)$$

onde  $A_{T,i}(t)$  é a disponibilidade do tramo  $i$ ,  $n$  é o número de tramos ( $2 \leq n \leq 3$ ).

A disponibilidade média, durante o tempo de operação do sistema, é calculada utilizando a Eq.2.21.

#### 5.4.2. Disponibilidade do subsistema de água gelada

Caso a configuração do Sistema ASC adote a instalação do subsistema de água gelada, pode-se calcular sua disponibilidade,  $A_{SSA}(t)$ , de forma semelhante ao descrito no item 5.3.1 para o subsistema de refrigeração. Nesse caso, porém, o número de conjuntos ventilador/serpentina, todos equivalentes, varia de um a três.

Uma peculiaridade do subsistema de água gelada está no fato de assumir-se que seus componentes não são construídos de acordo com os critérios de classe de segurança nuclear. Isso significa que o Sistema ASC não pode ser considerado disponível se o subsistema de refrigeração estiver indisponível, mesmo que o subsistema de água gelada seja capaz de manter a refrigeração da Sala de Controle.

#### 5.4.3. Disponibilidade do subsistema de filtragem

As unidades de filtragem possuem taxa de falha constante,  $\lambda$ , e sua confiabilidade é descrita por

$$R(t) = \exp[-\lambda t]. \quad (5.4)$$

Como em operação normal as unidades de filtragem estão em reserva, sua disponibilidade,  $A_{UF}(t)$ , é calculada por simplificação das Eq.2.27, Eq.2.33 e Eq.2.34. Assim,

$$\begin{cases} A_{UF,0}(t) = R(t), & 0 \leq t < T_1', \\ A_{UF,0}(t) = 0, & T_1' \leq t < T_1, \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\begin{cases} A_{UF,i}(t) = R(t) \cdot \{1 - P_{A,i} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_i)]\} , & T_i \leq t < T'_{i+1}, \\ A_{UF,i}(t) = 0 , & T'_{i+1} \leq t < T_{i+1}, \end{cases} \quad (5.6)$$

$$A_{UF,n}(t) = R(t) \cdot \{1 - P_{A,n} \cdot \exp[-v \cdot (t - T_n)]\} , \quad T_n \leq t \leq T_f, \quad (5.7)$$

onde  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , sendo  $n$  o número de testes realizados,  $T'_i$  é o instante do início do  $i$ -ésimo teste,  $T_i$  é o instante em que o componente é disponibilizado após este teste e  $T_f$  é o tempo de operação do sistema.

A disponibilidade do subsistema de filtragem,  $A_{SSF}(t)$ , tem a forma dada pela Eq.5.3, sendo que se pode ter uma ou duas unidades de filtragem.

#### 5.4.4. Disponibilidade do subsistema de ventiladores

Os ventiladores reforçadores possuem taxa de falha e confiabilidade nas formas dadas pelas Eq.5.1 e Eq.5.2, respectivamente. Porém, da mesma forma que as unidades de filtragem, os ventiladores reforçadores só entram em operação em modo de emergência e, dessa forma, a disponibilidade de cada um deles,  $A_{VR}(t)$ , segue as Eq.5.5, Eq.5.6 e Eq.5.7.

A disponibilidade do subsistema de ventiladores,  $A_{SSV}(t)$ , tem a forma dada pela Eq.5.3, sendo que se pode ter dois ou três ventiladores reforçadores.

#### 5.4.5. Disponibilidade do Sistema ASC

Como se assumiu que, caso seja instalado, o subsistema de água gelada não será construído com critérios de classe de segurança nuclear, para efeitos de cálculo de disponibilidade o Sistema ASC é composto por três subsistemas em série: refrigeração, filtragem e ventiladores. Isso equivale a dizer que o sistema estará funcional somente se todos esses subsistemas estiverem disponíveis. A disponibilidade do sistema ASC,  $A_{ASC}(t)$ , é expressa em função das disponibilidades dos subsistemas conforme a equação

$$A_{ASC}(t) = A_{SSR}(t) \cdot A_{SSF}(t) \cdot A_{SSV}(t) \quad (5.8)$$

Da mesma forma que foi definida para tramos e componente, a disponibilidade média do sistema é dada pela Eq.2.21.

## 5.5. Custos

O custo total relacionado à implantação de modificações no sistema, à operação e a manutenções e testes é composto pelas parcelas de custos individuais de cada componente. Semelhantemente ao descrito no Capítulo 3, item 3.3, os custos para cada componente envolvem: o custo de aquisição,  $C_{aq}$ , para o caso de modificação na estrutura do sistema por inclusão de novos componentes; o custo operacional,  $C_{op}$ , proporcional ao tempo de operação; os custos relativos às manutenções corretivas,  $C_{mc}$ , e manutenções preventivas/testes,  $C_{mp}$ .

Aos custos totais será incorporado o lucro cessante causado por um possível desligamento da usina em função da indisponibilidade do Sistema ASC.

### 5.5.1. Custos dos componentes

Os diferentes componentes apresentam distinções quanto ao cálculo de custos, sejam eles já existentes ou que devam ser adquiridos, estejam ora em operação ora em reserva ou simplesmente estejam sempre em reserva. De um modo geral, adaptando-se de acordo com as particularidades de cada componente, os custos totais por componente,  $C_T$ , são dados pela Eq.2.41.

### 5.5.2. Lucro cessante

Para o subsistema de refrigeração, na configuração atual, o critério adotado pela usina é o seguinte [54]: se houver falha em um dos tramos funcionais tem-se 7 dias para efetuar o reparo; se houver falha nos dois tramos funcionais tem-se somente 1 hora para efetuar o reparo em ao menos 1 deles e, caso se consiga o reparo, continua a contar o prazo de 7 dias para reparar o segundo. Diante dessas situações, caso não se cumpra os reparos dentro do limite de tempo estabelecido, inicia-se o processo de desligamento da usina. Nesse caso, em 1 hora a usina tem que estar em condição “desligado quente” (circuito primário a 292°C, usina sem geração). Neste período, caso se consiga reparar

ao menos um dos tramos, a usina pode voltar a gerar, e é religada à rede elétrica. Entre religamento e sincronismo considera-se um intervalo de 2 horas. No caso de não se reparar nenhum dos tramos dentro de 1 hora, dá-se continuidade ao processo de desligamento e resfriamento, como prazo de 36 horas para chegar à condição de “desligado frio” (primário a 92°C, usina sem geração). É importante ressaltar que uma vez iniciado este processo, o mesmo deve ser levado até o final e, uma vez atingido o patamar de “desligado frio”, são requeridas cerca de 48 horas para a usina voltar a gerar energia. Além disso, se entrar neste processo, a usina somente poderá iniciar o retorno depois de resolvidos os problemas nos dois tramos.

Para os subsistemas de filtragem e de ventiladores são seguidos os mesmos critérios [55]. Embora não sejam utilizados com a usina em operação normal, periodicamente são feitas manutenções preventivas e testes nesses subsistemas e, caso haja alguma falha, o procedimento é o mesmo descrito para o subsistema de refrigeração. Especificamente para o subsistema de filtragem, como só existe uma unidade de filtragem, o prazo para reparo é de 1 hora. Porém, em termos práticos isto não é tão crítico, pois como se trata de componentes de menor porte, uma eventual troca é rápida. Dessa forma, esses subsistemas não serão considerados na probabilidade de desligamento da usina.

Os prejuízos financeiros com os possíveis desligamentos da usina devido a indisponibilidades no subsistema de refrigeração serão computados nos custos totais com base em uma estimativa de número de desligamentos no período de análise (1800 dias). Tal estimativa é muito complexa devido à grande quantidade de fatores envolvidos. A seguir, será descrita uma proposta simplificada para determinação do número esperado de desligamentos, que foi utilizada nesse trabalho.

#### Caso 1: *Subsistema de refrigeração indisponível por mais de 1 hora:*

Do total do tempo em que o subsistema de refrigeração fica indisponível, é de interesse, nesse cálculo, somente o tempo em que o subsistema de água gelada também esteja indisponível, pois se considera somente as falhas reveladas. As falhas reveladas mesmo com o subsistema de água gelada disponível são desprezíveis. As etapas para se chegar à estimativa do número de desligamentos causados por este caso são:

- (i) determinar o período de tempo de indisponibilidade revelada;
- (ii) estimar, por meio do tempo médio de reparo do subsistema,  $TMR_{SSR}$ , o número de reparos realizados nesse período;

(iii) determinar, dentre os reparos realizados e utilizando o cálculo de probabilidade de tempo de reparo, quantos duram mais de 1 hora.

Chega-se, então, à expressão para o número estimado de desligamentos da usina para o caso 1,  $DU_1$ :

$$DU_1 = \tilde{A}_{SSA}^* \cdot \tilde{A}_{SSR}^* \cdot T_f \cdot n \cdot v \cdot \exp\left(-\frac{n \cdot v}{24}\right), \quad (5.9)$$

onde  $\tilde{A}_{SSA}^*$  é a indisponibilidade média do subsistema de água gelada,  $\tilde{A}_{SSR}^*$  é a indisponibilidade média do subsistema de refrigeração,  $T_f$  é o tempo de operação do sistema,  $n$  é o número de tramos funcionais de refrigeração e  $v$  é a taxa de reparo dada em  $\text{dia}^{-1}$ .

Caso 2: *Subsistema de refrigeração com um tramo indisponível por mais de 7 dias:*

Neste caso, um dos tramos continua disponível e somente um precisa ser reparado. As etapas, neste caso, são:

- (i) determinar o período de tempo de disponibilidade revelada em que somente um tramo está disponível;
- (ii) estimar, por meio do tempo médio de reparo de tramos, o número de reparos realizados nesse período;
- (iii) determinar, dentre os reparos realizados e utilizando o cálculo de probabilidade de tempo de reparo, quantos duram mais de 7 dias.

Dessa forma, tem-se:

$$DU_2 = \tilde{A}_{SSA}^* \cdot \sum_i^n \left[ A_i^* \cdot \prod_{j \neq i} \tilde{A}_j^* \right] \cdot T_f \cdot (n-1) \cdot v \cdot \exp(-n \cdot v \cdot 7), \quad (5.10)$$

onde  $A_i^*$  e  $\tilde{A}_j^*$  representam, respectivamente, as disponibilidades e as indisponibilidades médias dos tramos do subsistema de refrigeração.

É importante deixar claro que essas estimativas de desligamento da usina são extremamente simplificadas e têm o intuito de fornecer um dado para uso em um processo comparativo entre as alternativas de configuração do Sistema ASC. Notadamente, a inclusão do subsistema de água gelada é estimulada por essa forma de

cálculo, mas os estudos anteriores apontaram para esse tipo de configuração. Diante da necessidade de se determinar com precisão a probabilidade de desligamento da usina, um estudo mais aprofundado, que considere de maneira realista um maior número de fatores, se faz necessário. No entanto, para os objetivos desse estudo, que busca uma base comparativa na avaliação entre as possíveis soluções obtidas, e de acordo com a opinião de profissionais especializados, a forma como as estimativas foram feitas é satisfatória.

O próximo passo é determinar o intervalo médio de tempo para que a usina entre novamente em operação. Como os tempos médios de reparo são muito superiores a 1 hora, isto é,  $1/v \gg 1/24$  ( $[v] = \text{dia}^{-1}$ ), a possibilidade de retomar a operação da usina antes de se iniciar o processo que leva à condição “desligado quente” foi desconsiderada. O tempo total de cada desligamento corresponde ao tempo médio de reparo acrescido das 48 horas necessárias para levar a usina à condição normal de operação.

Considera-se que a usina opera em ciclos (intervalos entre paradas programadas da usina) de 360 dias com parada de 40 dias e tem um faturamento horário, em operação, de R\$54.600,00. Denominando  $TMR_1$  o tempo médio para reparo do caso 1 e  $TMR_2$  o tempo médio para reparo do caso 2, ambos em horas, a estimativa de custo com desligamentos devido à indisponibilidade do Sistema ASC,  $C_{DESL}$ , durante o tempo de operação do sistema,  $T_f$ , é dada por

$$C_{DESL} = [DU_1 \cdot (TMR_1 + 48) + DU_2 \cdot (TMR_2 + 48)] \cdot \frac{320}{360} \cdot 54600 \quad . \quad (5.11)$$

### 5.5.3. Custo do sistema

No processo de otimização, utilizando a Eq.2.42 e considerando que  $LC = C_{DESL}$ , os custos totais,  $C_{T,ASC}$ , passam a ser:

$$C_{T,ASC} = \sum_i CT_i + C_{DESL} \quad , \quad (5.12)$$

onde  $CT_i$  é o custo total do  $i$ -ésimo componente do Sistema ASC.



## 5.6. Objetivo da Otimização

O objetivo nessa etapa do trabalho é chegar a uma proposta de configuração do Sistema ASC, com o respectivo planejamento de manutenções, que seja considerada, dentro das condições de análise, a mais indicada para ser implementada. Para atingir tal meta, deve-se definir uma função de avaliação, a ser utilizada pelo AG no processo de otimização, por meio da qual o indivíduo de melhor aptidão será considerado a melhor solução. Essa função, agora denominada  $F_{ASC}$ , deve equilibrar a importância da disponibilidade média do sistema e dos custos totais.

A definição da função de avaliação se baseia na tentativa de atribuir um equilíbrio na ponderação entre a disponibilidade média do Sistema ASC e os custos totais. A simples minimização dos custos negligencia a importância de se ter o Sistema ASC disponível, levando em conta que se trata de um sistema de segurança da usina. Por outro lado, a simples maximização da disponibilidade pode resultar em uma configuração de sistema superdimensionada, implicando em custos excessivos.

Segundo os critérios desse estudo, o Sistema ASC, em sua atual configuração (dois tramos funcionais de refrigeração, uma unidade de filtragem e dois ventiladores reforçadores) e mantidas as periodicidades das intervenções, apresenta uma disponibilidade média de 0,7319. Esta é, portanto, a disponibilidade que servirá de ponto de partida para a otimização.

A operação do sistema não gera nenhum rendimento diretamente e, portanto, na aplicação do modelo descrito pela Eq.2.43 assume-se que  $k_1 = 0$ . Porém, conforme descrito no item 5.4.2, sua indisponibilidade pode levar a prejuízos devido ao lucro cessante. De forma simplificada, pode-se então definir uma função de avaliação que relacione diretamente, em um só termo,  $f_3$ , a disponibilidade média do sistema e os custos totais, e dessa forma assume-se que  $k_2 = 0$  e  $k_3 = 1$ .

Com base no exposto, optou-se por maximizar a função de avaliação, aqui denominada  $F_{ASC}$ , da forma

$$F_{ASC} = \frac{10^9 \cdot (A^* - 0,7319)}{C_{T,ASC}} \quad (5.13)$$

onde  $A^*$  é a disponibilidade média do sistema e  $C_{T,ASC}$  é dado pela Eq.5.12.

## 5.7. Algoritmo Genético

A modelagem do AG para a otimização do Sistema ASC baseia-se na adaptação do modelo apresentado na Figura 2.1, pois envolve escolha da configuração final, com definição do número de tramos e componentes para cada subsistema, e definição da política de manutenção.

Os instantes em que os tramos e os componentes serão submetidos a manutenções preventivas deverão ser determinados pelo AG no processo de otimização. As considerações iniciais sobre a manutenção preventiva, feitas no Capítulo 2, são válidas também para a aplicação ao Sistema ASC. Porém, como a frequência de intervenções, especificamente nesse caso, não permite uma variação significativa dos intervalos, as formas de distribuição das intervenções são praticamente equivalentes. Por simplificação, assumiu-se, que os intervalos entre manutenções preventivas seguem a distribuição proporcional, conforme descrito no Capítulo 2, item 2.3.1.

Os tramos/componentes, dentre os que compõem cada subsistema, são equivalentes em relação às suas características de confiabilidade e regime de operação. Com base nesse fato, admite-se que a política de manutenção adotada seja a mesma para todos os tramos/componentes pertencentes a um mesmo subsistema. Dessa forma, no genótipo, os tramos/componentes são condensados em uma estrutura única para cada subsistema. Ressalta-se, entretanto, que tal genótipo pode ser traduzido exatamente no mesmo conjunto de parâmetros de um candidato à solução, de acordo com o modelo de superestrutura descrito no Capítulo 2, item 2.6.

O algoritmo genético será responsável por indicar, para cada subsistema, o valor dos seguintes parâmetros:

1º- *Número de tramos/componente de cada subsistema*, dentro das configurações possíveis, conforme Figura 5.2.

2º- *Número de manutenções preventivas ou testes*, determinado para cada subsistema, pois se prevê igual número de manutenções ou testes para os tramos ou componentes de um mesmo subsistema..

3º- *Parâmetro  $\beta$* , o fator de proporcionalidade da distribuição proporcional, uma vez que esta foi a forma de distribuição previamente escolhida.

4º - *Deslocamento das manutenções*, para cada subsistema. Um valor igual a  $-1$  antecipa todas as manutenções de um subsistema em um mês em relação ao previsto pela distribuição; um valor igual a  $0$  mantém os instantes; um valor igual a  $1$  adia as manutenções em um mês.

A Figura 5.3 mostra a representação esquemática da estrutura do genótipo, formada por conjuntos que se repetem de acordo com o número de subsistemas que podem compor o Sistema ASC:

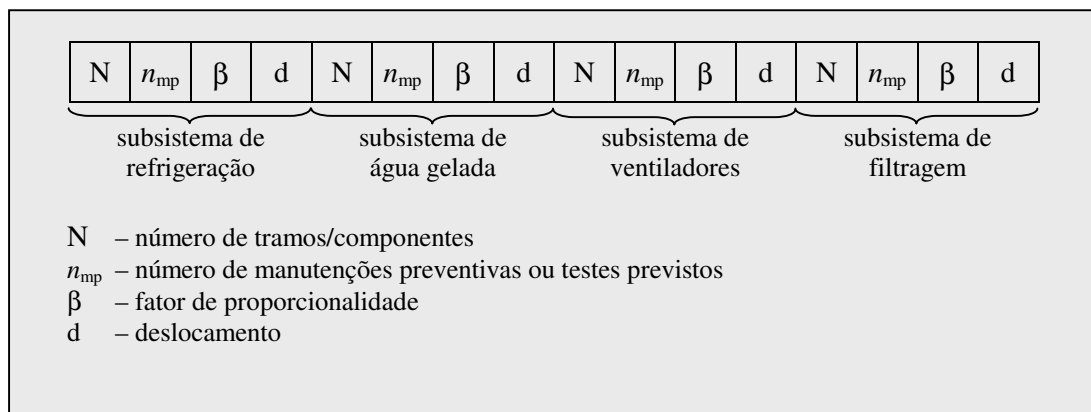


Figura 5.3. Representação esquemática do genótipo para o Sistema ASC.

## Capítulo 6

### – Otimização Integrada do Sistema ASC de Angra I –

#### 6.1. Introdução

Os resultados analisados nesse capítulo são provenientes da aplicação da metodologia de otimização integrada ao Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle (ASC) da usina nuclear de Angra I. O estudo tem por meta obter uma solução focada em dois objetivos: a maximização da disponibilidade média do sistema e a minimização dos custos totais, estes últimos envolvendo aquisição de componentes, operação do sistema e sua manutenção ao longo do horizonte de tempo considerado no estudo. De um modo geral, os objetivos são conflitantes, isto é, uma maior disponibilidade normalmente implica em custos mais elevados.

Considera-se de forma realista o funcionamento do sistema dentro das especificações técnicas definidas pela usina, gerando uma solução que possa ser aplicada diretamente.

Os dados aqui apresentados são provenientes de trabalho realizado a partir de informações obtidas em pesquisa de campo na usina nuclear de Angra I, com a permissão da Eletrobrás Termonuclear S.A. A seguir, os resultados obtidos no processo de otimização serão apresentados e avaliados.

#### 6.2. Dados de Entrada

##### 6.2.1. Informações gerais

O tempo de operação do sistema considerado no estudo de otimização é de cinco anos, ou mais precisamente,  $T_f = 1800$  dias. Considera-se, também, que as manutenções preventivas e os testes devem ser efetuados nas últimas 12 horas de cada período de 30 dias escolhido.

Os dados referentes aos parâmetros e características dos tramos e componentes de cada subsistema são apresentados na Tabela 6.1, onde:  $\theta$  e  $m$  são, nessa ordem, os

parâmetros de escala e de forma da distribuição Weibull; os índices *op* e *res* indicam regime de operação e de reserva, respectivamente;  $\nu$ , taxa de reparo, e  $\alpha$ , fator de recondiçãoamento, são constantes; e  $\Delta t_{mp,med}$  é o tempo médio de manutenção preventiva ou teste.

Tabela 6.1. Dados característicos dos tramos e componentes do Sistema ASC.

	S U B S I S T E M A S			
	Água Gelada	Refrigeração	Filtragem	Ventiladores
$m_{op}$	1,3065	1,3604	—	—
$\theta_{op}$ (dia)	51,07	28,76	—	—
$m_{res}$	1,9520	1,5555	1	1,9520
$\theta_{res}$ (dia)	157,30	97,80	1166	157,30
$\nu$ (dia <sup>-1</sup> )	0,2260	0,3132	0,1489	0,2260
$\Delta t_{mp,med}$ (dia)	0,3894	0,5928	0,3148	0,3894
$\alpha$	0,994	0,994	0,963	0,988

A Tabela 6.2 apresenta as estimativas de custos relativos a componentes e tramos funcionais, a saber: custo de aquisição, no caso de modificação da estrutura original do sistema por acréscimo de componentes ou tramos; custo operacional por unidade de tempo; custo por manutenção preventiva/teste; custo com manutenção corretiva por unidade de tempo.

Tabela 6.2. Custos relativos aos componentes e tramos do Sistema ASC.

	S U B S I S T E M A S			
	Água Gelada	Refrigeração	Filtragem	Ventiladores
<b>Aquisição (R\$)</b>	141.000,00	1.460.000,00	60.000,00	72.930,00
<b>Operacional (R\$/h)</b>	3,61	4,11	—	0,18
<b>Mnt Prev / Teste (R\$/mnt)</b>	639,18	2.916,03	517,11	639,18
<b>Mnt Corr (R\$/h)</b>	71,37	320,40	70,39	70,80

Os valores de aquisição para os tramos de água gelada são baseados em valores comuns de mercado, enquanto para os demais tramos e componentes leva-se em conta os valores para classe de segurança nuclear. Os custos operacionais são basicamente devidos ao consumo de energia elétrica ao custo de R\$105,00 por MWh, enquanto as estimativas relativas às manutenções e testes levam em conta a relação homem-hora (HH) das equipes empregadas e materiais de consumo.

Outro ponto importante é o faturamento da usina de Angra I quando está conectada ao sistema elétrico. Baseando-se em uma produção média de 520MW e o valor de R\$105,00 por MWh, a estimativa de faturamento fica em R\$54.600,00 por hora de operação.

#### 6.2.2. Subsistema de água gelada

O subsistema de água gelada não está atualmente instalado no Sistema ASC da usina de Angra I. Sua possível inclusão tem por objetivo poupar os tramos de refrigeração convencionais. Portanto, o subsistema de água gelada operaria prioritariamente enquanto o subsistema de refrigeração permaneceria em reserva, só entrando esse último em operação no caso da indisponibilidade do primeiro.

Admite-se que o subsistema de água gelada tenha de um a três conjuntos ventilador/serpentina de fabricação comum (sem requisitos de classe de segurança) e não participa diretamente da disponibilidade do Sistema ASC. Caso o subsistema de refrigeração falhe, considera-se que o Sistema ASC fica indisponível mesmo que o subsistema de água gelada esteja operacional. Se houver mais de um conjunto ventilador/serpentina, esses se revezarão mensalmente.

Especificamente para o estudo realizado no item 6.4, onde se considera a possibilidade de desligamento da usina em situações definidas pelas especificações técnicas, a disponibilidade do subsistema de água gelada é levada em conta. Se o subsistema de água gelada estiver operacional, é possível que falhas do subsistema de refrigeração não sejam reveladas e, assim, a usina não seria desligada.

#### 6.2.3. Subsistema de refrigeração

O subsistema de refrigeração conta, atualmente, com dois tramos funcionais, e estuda-se a possibilidade de inclusão de um terceiro. Os tramos se revezam em escala

mensal, que indica qual deve estar em operação ou disponível para operar no caso de indisponibilidade do subsistema de água gelada. Considera-se, neste estudo, que mesmo que o sistema de água gelada esteja disponível, no início do mês em que um dado tramo de refrigeração esteja escalado, ele é ligado para verificar sua disponibilidade.

#### 6.2.4. Subsistema de filtragem

O subsistema de filtragem possui, na atual configuração do sistema ASC, apenas uma unidade de filtragem. O estudo de otimização permite a inclusão de mais uma unidade redundante de classe nuclear, semelhante ao já instalado. Na condição de operação normal, o subsistema de filtragem fica em reserva.

#### 6.2.5. Subsistema de ventiladores

O subsistema de ventiladores é formado por ventiladores reforçadores que são necessários para compensar a perda de carga da passagem do ar pelas unidades de filtragem. Atualmente existem dois ventiladores reforçadores, classe de segurança nuclear, na configuração do Sistema ASC e admite-se, no estudo, a inclusão de mais um desses ventiladores. Na condição de operação normal, juntamente com o subsistema de filtragem, o subsistema de ventiladores permanece em reserva.

### **6.3. Resultados da Otimização**

Para o tratamento do problema de otimização, a exemplo do aplicado para o sistema hipotético no Capítulo 4, foi construída uma planilha utilizando o software Microsoft® Excel 2000 tendo como suplemento o software GeneHunter™ [51] para execução do algoritmo genético. Os parâmetros utilizados pelo AG são os dados pela Tabela C.1, no Apêndice C.

O objetivo nessa etapa do trabalho é chegar a uma proposta de configuração do Sistema ASC, com o respectivo planejamento de manutenções, que seja considerada, dentro das condições de análise, a mais indicada para ser implementada. Para atingir tal meta, deve-se maximizar a função de avaliação,  $F_{ASC}$ , dada pela Eq.5.13.

A configuração do sistema e o respectivo planejamento de manutenções que obtiveram a melhor aptidão, obtidos por meio de uma busca exaustiva pelo emprego do AG, serão apresentados a seguir. A solução encontrada que apresentou o máximo valor de  $F_{ASC}$  é mostrada na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Resultados da solução de melhor aptidão para o Sistema ASC.

$F_{ASC}$ (R $\$^{-1}$ )	$A^*$	$C_{T,ASC}$ (R $\$$ )
<b>148,16</b>	0,9700	1.607.227,32

Optou-se pela instalação do subsistema de água gelada, que fica composto por três conjuntos ventilador/serpentina. A Tabela 6.4 resume as opções para esse subsistema.

Tabela 6.4. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de água gelada.

número de tramos	3
número de manutenções	19
fator de proporcionalidade ( $\beta$ )	1,00
deslocamento das manutenções	+1

As Figuras 6.1 a 6.3 mostram a curva de disponibilidade versus tempo para cada um dos tramos e a Figura 6.4 apresenta a curva de disponibilidade para o subsistema.

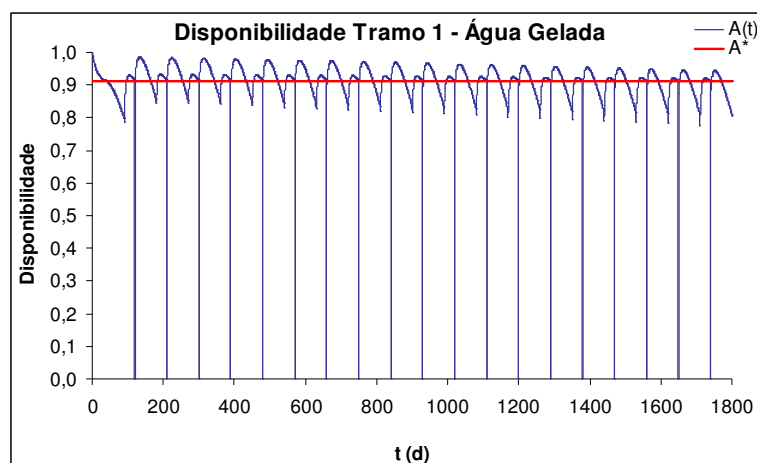


Figura 6.1. Curva de disponibilidade para o tramo 1 do subsistema de água gelada.



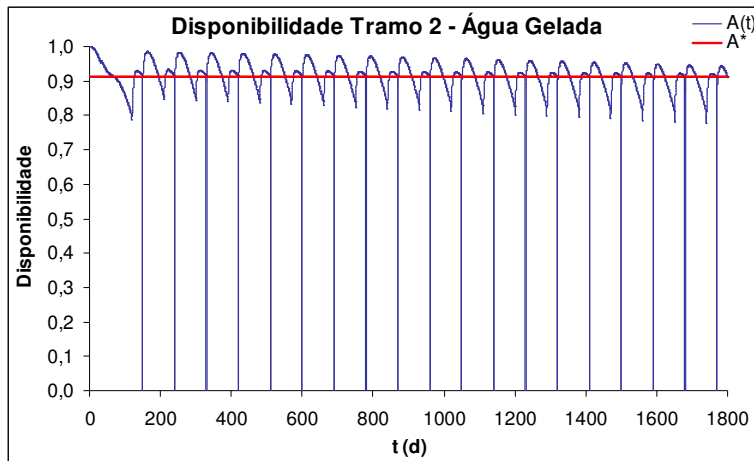


Figura 6.2. Curva de disponibilidade para o tramo 2 do subsistema de água gelada.

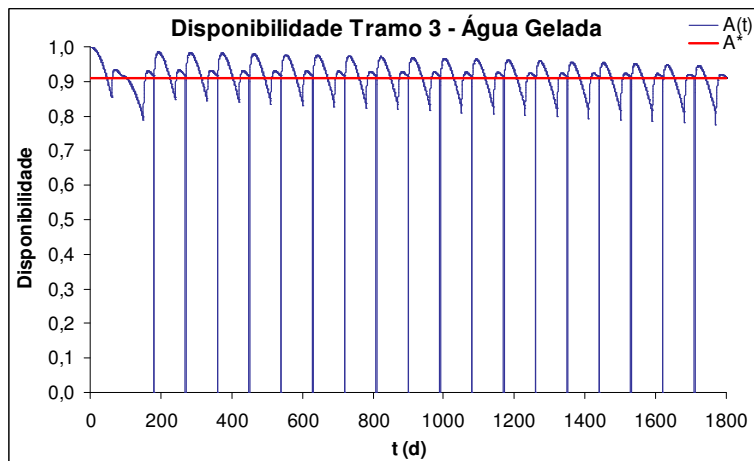


Figura 6.3. Curva de disponibilidade para o tramo 3 do subsistema de água gelada.

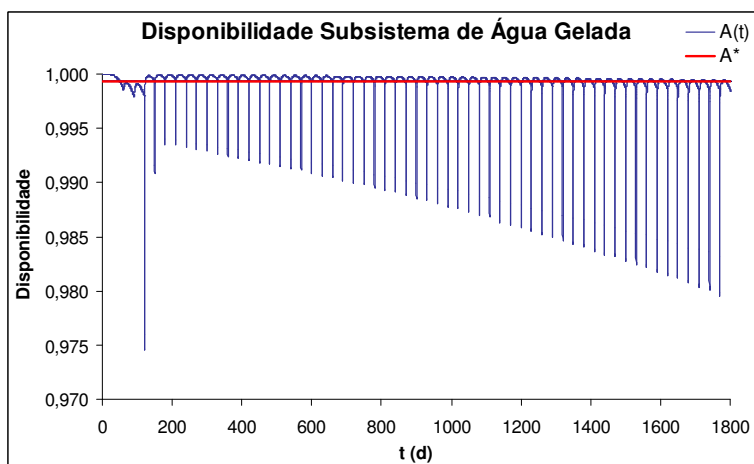


Figura 6.4. Curva de disponibilidade do subsistema de água gelada.

O subsistema de refrigeração foi mantido com dois tramos funcionais, porém o planejamento de manutenções prevê um acréscimo na frequência de intervenções. A Tabela 6.5 mostra as opções para esse subsistema.

Tabela 6.5. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de refrigeração.

número de tramos	2
número de manutenções	29
fator de proporcionalidade ( $\beta$ )	1,00
deslocamento das manutenções	0

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram a curva de disponibilidade versus tempo para cada um dos tramos e a Figura 6.7 mostra a curva de disponibilidade para o subsistema.

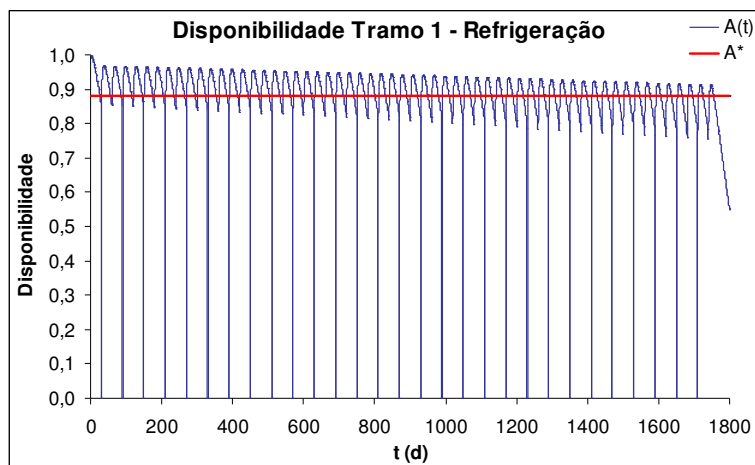


Figura 6.5. Curva de disponibilidade para o tramo 1 do subsistema de refrigeração.

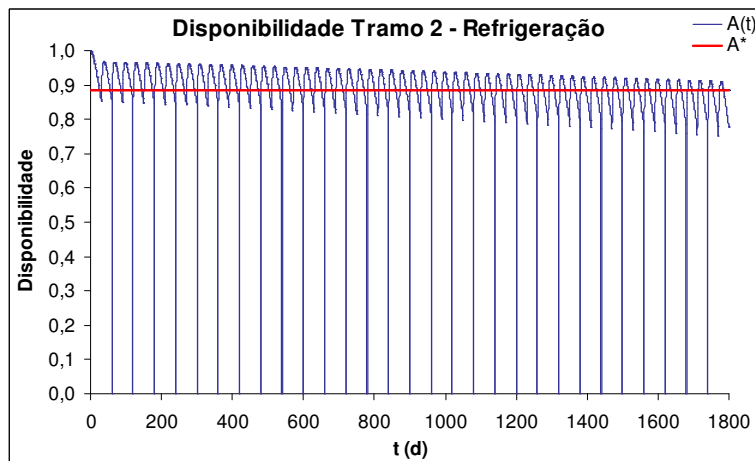


Figura 6.6. Curva de disponibilidade para o tramo 2 do subsistema de refrigeração.

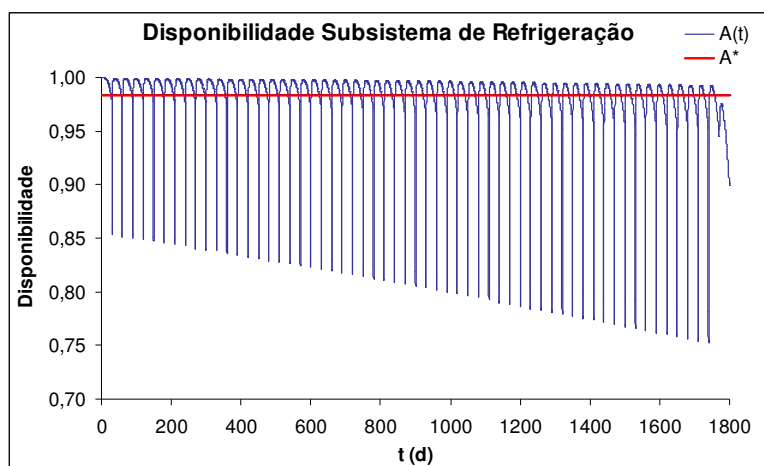


Figura 6.7. Curva de disponibilidade do subsistema de refrigeração.

O subsistema de filtragem foi acrescido de mais uma unidade e o planejamento de manutenções prevê um acréscimo na frequência de intervenções. A Tabela 6.6 mostra as opções para esse subsistema.

Tabela 6.6. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de filtragem.

número de unidades	2
número de manutenções	19
fator de proporcionalidade ( $\beta$ )	1,00
deslocamento das manutenções	-1

As Figuras 6.8 e 6.9 mostram as curvas de disponibilidade versus tempo para as unidades. A Figura 6.10 mostra a curva de disponibilidade para o subsistema.

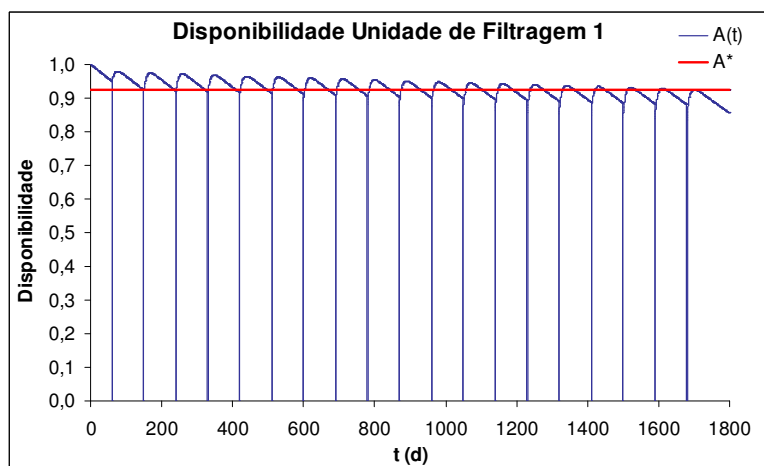


Figura 6.8 Curva de disponibilidade para a unidade de filtragem 1.

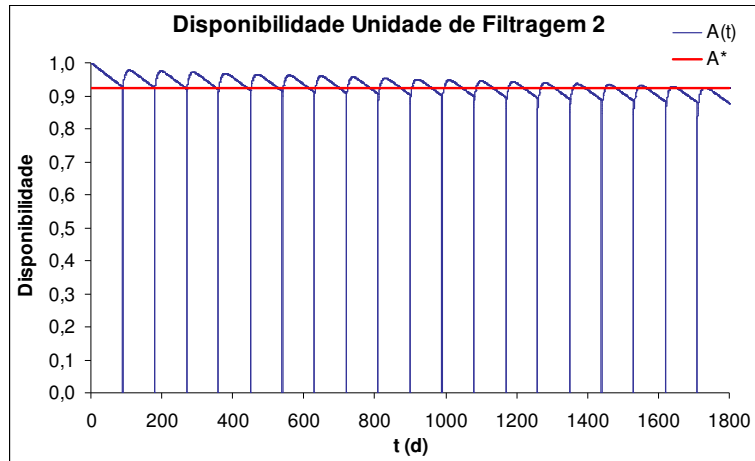


Figura 6.9. Curva de disponibilidade para a unidade de filtragem 2.

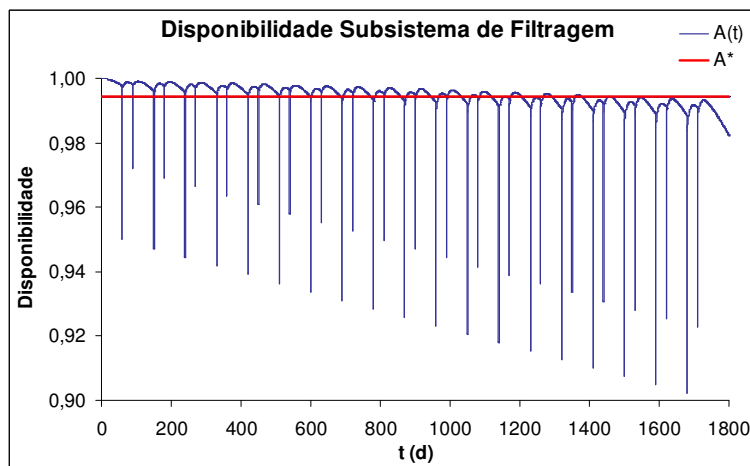


Figura 6.10. Curva de disponibilidade do subsistema de filtragem.

Finalmente, o subsistema de ventiladores permaneceu com dois componentes, mas o planejamento de manutenções também prevê um acréscimo na frequência de intervenções. A Tabela 6.7 mostra as opções para esse subsistema.

Tabela 6.7. Resultados da solução de melhor aptidão para o subsistema de ventiladores.

número de unidades	2
número de manutenções	29
fator de proporcionalidade ( $\beta$ )	1,00
deslocamento das manutenções	+1

As Figuras 6.11 e 6.12 mostram as curvas de disponibilidade versus tempo para os ventiladores. A Figura 6.13 mostra a curva de disponibilidade para o subsistema.

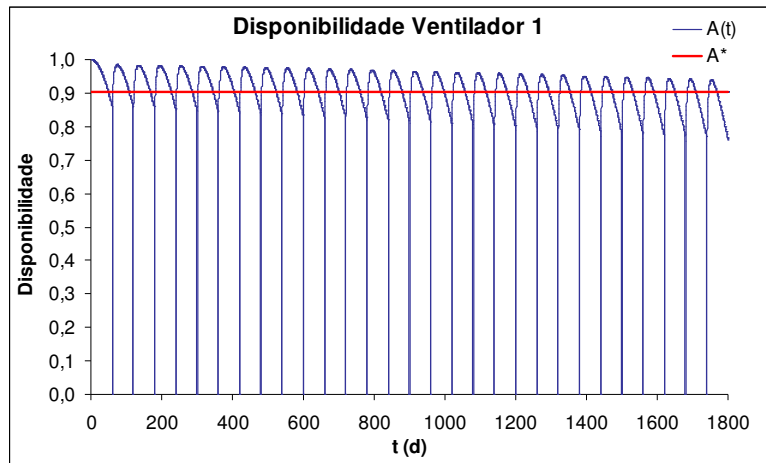


Figura 6.11. Curva de disponibilidade para o ventilador 1 do subsistema de ventiladores.

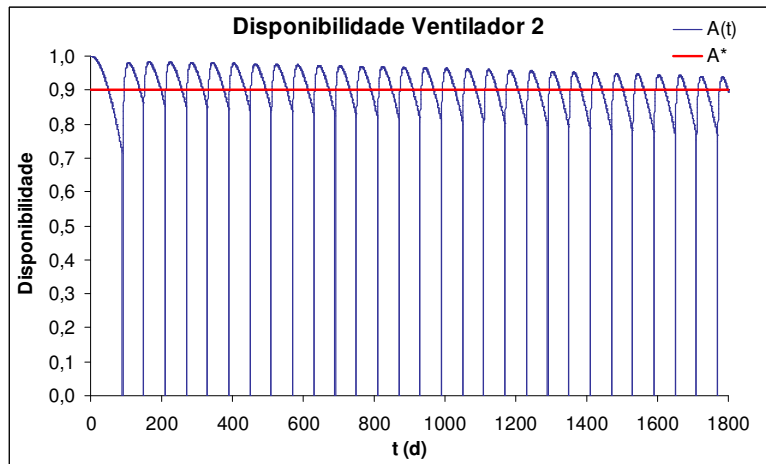


Figura 6.12. Curva de disponibilidade para o ventilador 2 do subsistema de ventiladores.

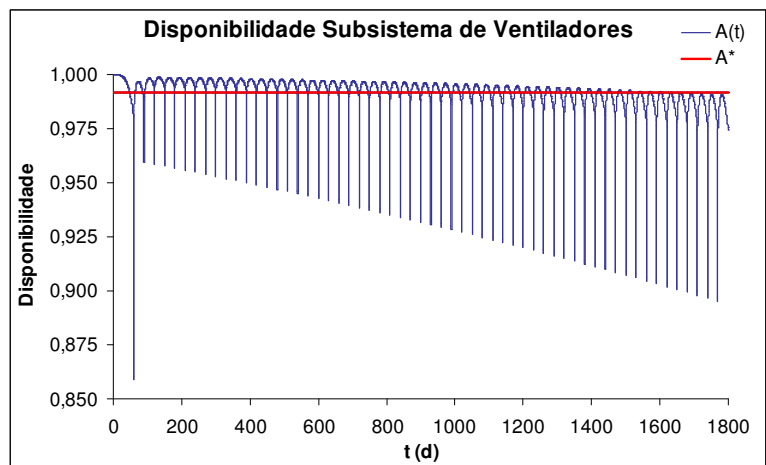


Figura 6.13. Curva de disponibilidade do subsistema de ventiladores.

Por fim, a Figura 6.14 apresenta a curva de disponibilidade versus tempo para o Sistema ASC, de acordo com a configuração e o planejamento de manutenções dos subsistemas estabelecidos no processo de otimização.

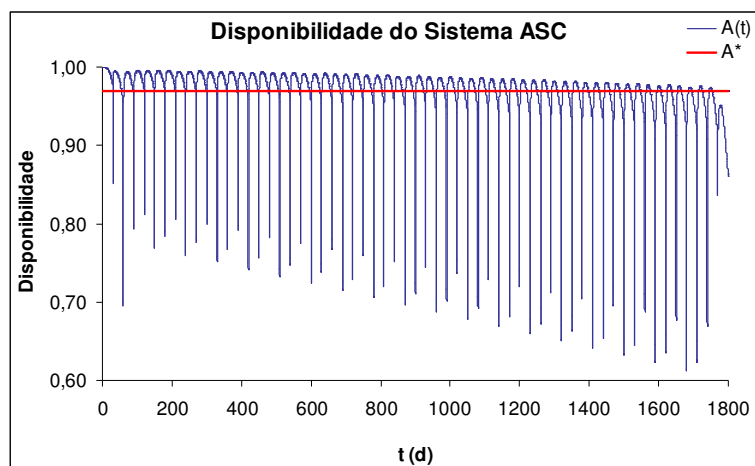


Figura 6.14. Curva de disponibilidade do Sistema ASC.

Uma representação geral das disponibilidades médias de todos os componentes, tramos, subsistemas e do Sistema ASC está na Tabela 6.8. A Figura 6.15 mostra a representação esquemática da configuração do Sistema ASC de acordo com a solução de melhor aptidão.

Tabela 6.8. Disponibilidades médias de acordo com a solução de melhor aptidão.

		Disponibilidade média ( $A^*$ )		
ASC	SSA	Tramo 1	0,9103	0,9993
		Tramo 2	0,9119	
		Tramo 3	0,9114	
	SSR	Tramo 1	0,8828	0,9836
		Tramo 2	0,8861	
	SSF	Unidade 1	0,9251	0,9943
		Unidade 2	0,9253	
	SSV	Ventilador 1	0,9015	0,9916
		Ventilador 2	0,8993	

SSA – Subsistema de água gelada  
 SSR – Subsistema de refrigeração  
 SSF – Subsistema de filtragem  
 SSV – Subsistema de ventiladores

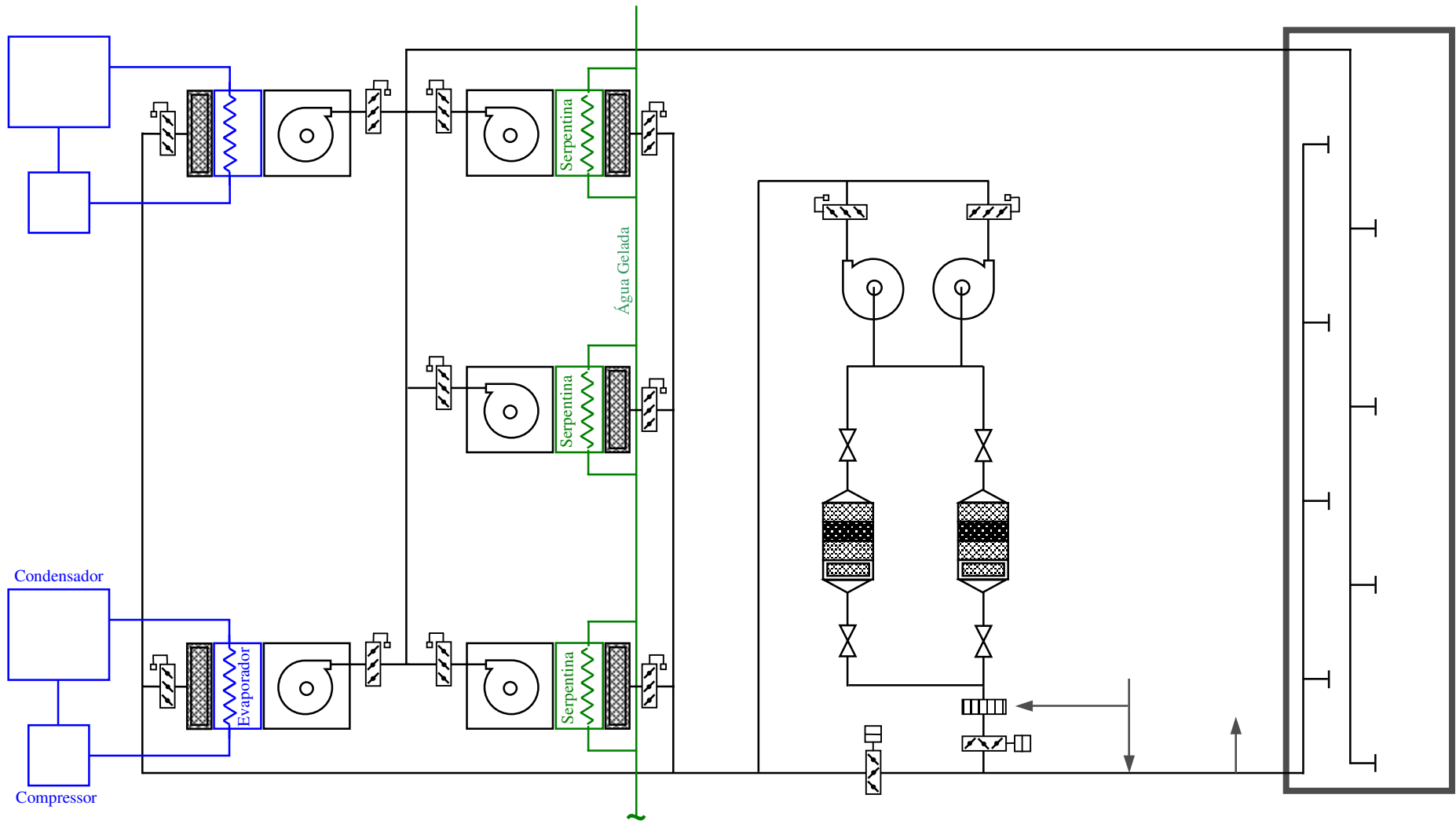


Figura 6.15. Esquema simplificado da estrutura otimizada do Sistema ASC.

O planejamento de manutenções e testes para todos os tramos funcionais e componentes, discriminando os meses em que ocorrerão intervenções, estão disponíveis no Apêndice E.

#### **6.4. Análise dos Resultados**

A metodologia de otimização integrada aplicada ao Sistema ASC proporcionou uma compreensão da integração entre os diversos subsistemas e a intensidade da contribuição de cada um deles na performance geral do sistema. Embora a otimização tenha se baseado principalmente em termos comparativos entre as diversas opções de configuração e planejamento de manutenções, as informações servem para nortear a busca por soluções viáveis. De um modo geral, a metodologia de aplicação da otimização integrada cumpre seu objetivo de colaborar como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Analisando os resultados, pode-se fazer algumas considerações de caráter prático. Para todos os subsistemas o fator de proporcionalidade,  $\beta$ , foi igual a 1, indicando que os intervalos entre intervenções são mantidos constantes ao longo do período analisado. Isso equivale a dizer que os efeitos do envelhecimento durante o período de tempo analisado não foram significativos a ponto de se aumentar a frequência de intervenções com o passar do tempo. Significa, também, que a escolha do modo de distribuição das intervenções não tem qualquer interferência nos resultados da aplicação ao Sistema ASC, pois como  $\beta = 1$ , não há distinção entre as distribuições proporcional e exponencial.

O subsistema de água gelada ficou composto por 3 tramos, com periodicidade de manutenções preventivas trimestral. Essa estrutura pode ter sido superestimada devido ao fato da função de avaliação valorizar o efeito da presença desse subsistema na redução da probabilidade de desligamento da usina. Mas, embora se possa questionar o número de tramos indicados nesse estudo, a instalação do subsistema de água gelada mostra-se vantajosa. Uma outra opção, segundo a opinião de profissionais envolvidos com o Sistema ASC, é utilizar os próprios ventiladores do subsistema de refrigeração, acoplando somente as serpentinas ligadas ao Sistema de Água Gelada da usina. Dois dos tramos podem ser montados dessa forma e o terceiro instalado com ventilador



independente. A única desvantagem é a redução na capacidade de poupar o subsistema de refrigeração, objetivo principal da instalação do subsistema de água gelada.

A instalação do subsistema de água gelada apresenta uma peculiaridade contrária ao senso comum: a inclusão desse subsistema produz uma queda na disponibilidade média do sistema e reduz os custos totais. O decréscimo na disponibilidade é explicado pelo fato do subsistema de refrigeração passar a ficar em reserva a partir da instalação do subsistema de água gelada, o que gera a possibilidade de ocorrer falhas que não sejam reveladas e, portanto, não sujeitas à imediata ação corretiva. Como a disponibilidade do Sistema ASC não considera o subsistema de água gelada, ocorre a queda na disponibilidade. Para contornar esse fator adverso, ou ao menos minimizá-lo, deve-se fazer uma readaptação do planejamento de manutenções preventivas à nova realidade. A redução nos custos totais ocorre porque a diminuição dos gastos com manutenção corretiva, devido ao fato do subsistema de refrigeração ser poupado pela inclusão do subsistema de água gelada, é maior que os custos referentes a este último.

A decisão de manter o subsistema de refrigeração com dois tramos mostra que o custo de instalação de um terceiro não é compensado pelo ganho de performance do sistema. O aumento da frequência de manutenções preventivas, de trimestral para bimestral, foi a forma mais vantajosa de aumento de disponibilidade do subsistema de refrigeração. A adoção do subsistema de água gelada, embora reduza a disponibilidade do sistema, é melhor estrategicamente devido à redução dos custos totais.

Quanto ao subsistema de filtragem, a colocação de uma unidade de filtragem redundante confere um ganho significativo na disponibilidade do Sistema ASC, embora esse subsistema só opere em situações de emergência. A falta de redundância, que implica em vulnerabilidade, e o custo relativamente baixo da implantação de mais uma unidade de filtragem, em função do ganho obtido, são fatores que favorece essa configuração. O aumento da frequência de intervenções, que passa a ser trimestral, é também importante para o efeito benéfico global da nova configuração do subsistema de filtragem.

Para o subsistema de ventiladores, não houve previsão de mudança de estrutura, mas a melhoria na disponibilidade média deu-se por uma maior frequência de manutenções preventivas, que passa a ter frequência trimestral. A alta disponibilidade média obtida com o novo planejamento de manutenções sobre a configuração atual foi importante para manter-se a estrutura inalterada.

## 6.5. Considerações sobre Apoio à Decisão

O objetivo do processo de otimização do Sistema ASC foi maximizar a  $F_{ASC}$ . Porém, a exemplo do exposto no item 4.6, pode ser vantajoso obter um conjunto de soluções que poderão ser analisadas para se observar tendências de configurações que podem servir como argumento à tomada de decisão. Por exemplo, se a alocação de alguma redundância ou determinado planejamento de manutenções sempre figuram entre as diversas soluções, independentemente da ponderação feita entre disponibilidade e custos, este fato é um forte indício de que é vantajoso se adotar tal redundância ou planejamento de manutenções.

O Apêndice C traz um estudo deste tipo, aplicado ao Sistema ASC, mostrando que informações úteis podem assim ser obtidas. O Apêndice D traz uma relação das soluções obtidas nesse estudo.

## Capítulo 7

### – Conclusões e Recomendações –

O desenvolvimento de métodos de otimização que abordem de maneira integrada o maior número possível de parâmetros relacionados ao desempenho de sistemas é um desafio que merece atenção especial. As vantagens obtidas ao se considerar a interação entre os fatores envolvidos com o projeto, a operação e a manutenção de sistemas deve servir de motivação para superar as possíveis dificuldades técnicas de implementação de tais técnicas.

Dentro dos objetivos deste trabalho, a modelagem do cálculo da disponibilidade de sistemas, buscando retratar diferentes condições de operação, tem flexibilidade para se adaptar à descrição de componentes e sistemas reais. Essa modelagem tem a vantagem de permitir o tratamento do problema de otimização sem que seja necessário fazer transformações em suas variáveis, visto que estas transformações normalmente são fatores que introduzem erros. Deve-se destacar, ainda, o tratamento dado à manutenção na formulação da disponibilidade, a possibilidade de adaptação a diferentes modos de falha e o fato de considerar que o sistema, após manutenção ou teste, pode não retornar a um estado tão bom quanto novo.

A aplicação da modelagem da distribuição dos instantes de intervenções (manutenção preventiva e testes) mostrou-se eficaz para orientar a pesquisa do AG por soluções otimizadas. Esses modelos de distribuição reduzem o espaço de busca, eliminando do universo de possíveis soluções muitos resultados que não seriam condizentes com um planejamento de manutenções realista. Considere-se o seguinte: se para um componente são previstas dez manutenções em um intervalo de cinco anos, um planejamento de manutenções semestrais é coerente, enquanto, por exemplo, realizar oito intervenções no primeiro ano, uma no seguinte e uma no quarto ano não tem comumente qualquer compromisso prático. Desta forma, ao se aplicar o modelo de distribuição de intervenções, o AG não dedica tempo ao cálculo da aptidão de um grande número de indivíduos que não seriam capazes de representar soluções viáveis.

Os resultados obtidos através do estudo de otimização do sistema hipotético permitem concluir que a aplicação da otimização integrada tem a capacidade de encontrar soluções que escapariam a métodos onde a otimização é feita de maneira

segmentada, não observando o vínculo existente entre projeto, operação e manutenção. No caso estudado, o simples fato de se definir a estrutura previamente impediu que a otimização aplicada *a posteriori* tivesse a possibilidade de chegar à melhor solução encontrada pela otimização integrada. Em resumo, quaisquer conjuntos de soluções obtidas por processos de otimização segmentados podem ser vistos como subconjuntos das soluções fornecidas por uma otimização integrada, e esses subconjuntos podem não conter as melhores soluções.

Quanto às possíveis aplicações práticas, em primeiro lugar é preciso perceber que nem sempre será possível aplicar a otimização integrada em sua plenitude, uma vez que os sistemas já existentes podem não ter flexibilidade suficiente para acomodar certas modificações. De qualquer forma, deve-se procurar enquadrar o maior número possível de parâmetros relevantes, o que, em se tratando de sistemas reais de uma usina nuclear, pode tornar o problema de otimização extremamente complexo. Certamente o número de parâmetros de projeto, de variáveis de processo e de conceitos e metodologias de manutenção será muito grande, possivelmente levando à necessidade de aplicação de algoritmos genéticos com processamento paralelo para redução de tempo computacional.

A aplicação da otimização integrada ao Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle (ASC) da usina de Angra I, que é um sistema de segurança, comprova a adaptabilidade da metodologia a situações práticas. Certamente, a escolha da forma de avaliar as possíveis soluções influi fortemente no resultado final dos estudos e, por isso, deve ser o ponto chave inicial do processo de otimização. Em conjunto com outras técnicas e procedimentos de análise, as informações obtidas por meio do estudo realizado prestam-se ao apoio à decisão.

A proposta de configuração do Sistema ASC, de uma forma geral, está de acordo com as expectativas e a experiência dos profissionais ligados a esse sistema na usina. Esse fato corrobora a aplicabilidade do método, e a análise conduzida neste trabalho pode ser utilizada como argumento de apoio à implantação de modificações de projeto e planejamento de manutenções, contribuindo com a realização de melhorias na usina. A confirmação da aplicabilidade prática do método deve ser um estímulo a seu desenvolvimento e a futuras aplicações.

Ainda em relação ao Sistema ASC, cabem, aqui, algumas sugestões. O estudo de otimização foi feito com base no funcionamento em modo de operação normal do sistema. Esse trabalho pode ser expandido de forma a incluir, também, o funcionamento

do sistema em modo de emergência. Dentro da aplicação da modelagem matemática, pode-se diferenciar e especificar os tipos de manutenção e testes realizados, como, por exemplo, manutenção preditiva ou teste vibracional.

Para consolidação do modelo, sugere-se que haja uma realimentação contínua dentro do binômio aplicação-desenvolvimento. Para se utilizar as técnicas de otimização integrada com maior abrangência, deve-se fazer aplicações a sistemas ainda em fase de projeto, onde é possível interferir na concepção da estrutura a ser adotada.

Em relação às técnicas de otimização é interessante que se faça uso de alternativas para aperfeiçoar e acelerar o processo de obtenção de resultados. Como já foi dito, em casos mais complexos, o processamento paralelo pode ser um fator diferencial. Como alternativa à ferramenta de otimização, o emprego de outras técnicas metaheurísticas merece ser alvo de futuros estudos.

Finalmente, é importante enfatizar que, neste trabalho, a aplicação de técnicas de otimização integrada não tem a pretensão de consagrá-la como ferramenta única e suficiente na resolução de problemas de otimização de confiabilidade. O conhecimento humano é reconhecidamente um fator preponderante na definição dos critérios de ponderação, refinamento e adequação dos resultados às aplicações práticas.

## Referências Bibliográficas

- [1] LEWIS, E. E., *Introduction to Reliability Engineering*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 1996.
- [2] VILLEMEUR, A., *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment –Volume 1: Methods and Techniques*. 1 ed. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1992.
- [3] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Reactor safety study : an assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants*, WASH-1400, NUREG 75/014, 1975.
- [4] TILLMAN, F. A., HWANG, C. L., KUO, W., *Optimization of Systems Reliability*. 1 ed. New York, Marcel Dekker, 1980.
- [5] GEN, M., KIM, J. R., “GA-based Reliability Design: Statate-of-the-Art Survey”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 37, pp. 151-155, 1999.
- [6] GOLDBERG, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1 ed. USA, Addison Wesley Longman, 1989.
- [7] CHAPOT, J. L C., “Da Teoria da Evolução de Darwin aos Algoritmos Genéticos de Holland”. In: *Otimização Automática de Recargas de Reatores a Água Pressurizada Utilizando Algoritmos Genéticos*, capítulo 2, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- [8] RACKWITZ, R., “Reliability analysis – a review and some perspectives”, *Structural Safety*, v. 23, pp. 365-395, 2001.
- [9] DEKKER, R., “Applications of maintenance optimization models: a review and analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 51, pp. 229-240, 1996.

- [10] DEKKER, R., SCARF, P. A., “On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 60, pp. 111-119, 1998.
- [11] SANMARTÍ, E., ESPUÑA, A., PUIGJANER, L., “Batch production and preventive maintenance scheduling under equipment failure uncertainty”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 21, n. 10, pp. 1157-1168, 1997.
- [12] VASSILIADIS, C. G., PISTIKOPOULOS, E. N., “Maintenance scheduling and process optimization under uncertainty”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 25, pp. 217-236, 2001.
- [13] ZAFIROPOULOS, E. P., DIALYNAS, E. N., “Reliability and cost optimization of electronic devices considering the component failure rate uncertainty”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 84, pp. 271-284, 2004.
- [14] PISTIKOPOULOS, E. N., VASSILIADIS, C. G., ARVELA, J., et al., “Interactions of Maintenance and Production Planning for Multipurpose Process Plants – A System Effectiveness Approach”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 40, pp. 3195-3207, 2001.
- [15] ROYSET, J. O., DER KIUREGHIAN, A., POLAK, E., “Reliability-based optimal structural design by the decoupling approach”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 73, pp. 213-221, 2001.
- [16] LINS, R. P., *Cálculo da Confiabilidade de Sistemas sob Envelhecimento Através do Método dos Estágios e de Algoritmos Genéticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [17] WANG, H., “A survey of maintenance policies of deteriorating systems”, *European Journal of Operational Research*, v. 139, pp. 469–489, 2002.

- [18] HSIEH, Y. C., “A linear approximation for redundant reliability problems with multiple component choices”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 44, pp. 91-103, 1997.
- [19] HA, C., KUO, W., “Reliability redundancy allocation: An improved realization for nonconvex nonlinear programming problems”, *European Journal of Operational Research*, v. 171, pp. 24-38, 2006.
- [20] BRIS, R., CHÂTELET, E., YALAOUI, F., “New method to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 82, pp. 247-255, 2003.
- [21] DUARTE, J. A. C., CRAVEIRO, J. C. T. A., TRIGO, T. P., “Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 83, pp. 244-248, 2006.
- [22] YU, H., YALAOUI, F., CHÂTELET, E., et al., “Optimal design of a maintainable cold-standby system”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 92, pp. 85-91, 2007.
- [23] HERRERA, F., LOZANO, M., MOLINA, D., “Continuous scatter search: An analysis of the integration of some combination methods and improvement strategies”, *European Journal of Operational Research*, v. 169, pp. 450-476, 2006.
- [24] SAMROUT, M., YALAOUI, F., CHÂTELET, E., et al., “New methods to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems using ant colony optimization”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 89, pp. 346-354, 2005.
- [25] GOEL, H. D., GRIEVINK, J., HERDER, P. M., et al., “Integrating reliability optimization into chemical process synthesis”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 78, pp. 247-258, 2002.



- [26] GOEL, H. D., GRIEVINK, J., WEIJNEN, M. P. C., “Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 27, pp. 1543-1555, 2003.
- [27] FRANGOPOULOS, C. A., DIMOPOULOS, G. G., “Effect of reliability considerations on the optimal synthesis, design and operation of a cogeneration system”, *Energy*, v. 29, pp. 309-329, 2004.
- [28] HSIEH, Y. C., CHEN, T. C., BRICKER, D. L., “Genetic algorithm for reliability design problems”, *Microelectronics Reliability*, v. 38, pp. 1599-1605, 1998.
- [29] BUSACCA, P. G., MARSEGUERRA, M., ZIO, E. “Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 72, pp. 59-74, 2001.
- [30] LEVITIN, G., LISNIANSKI, A. “Structure optimization of multi-state system with two failure modes”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 72, pp. 75-89, 2001.
- [31] LEVITIN, G., LISNIANSKI, A., “Reliability optimization for weighted voting system”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 71, pp. 131-138, 2001.
- [32] YUN, W. Y., KIM, J. W., “Multi-level redundancy optimization in series systems”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 46, pp. 337-346, 2004.
- [33] JUANG, Y. S., LIN, S. S., KAO, H. P., “A knowledge management system for series-parallel availability optimization and design”, *Expert Systems with Applications*, 2006, in press.
- [34] PEREIRA, C. M. N. A., SCHIRRU, R., MARTINEZ, A. S., “Basic investigations related to genetic algorithm in core designs”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 26, pp. 173-193, 1999.

- [35] CHAPOT, J. L. C., DA SILVA, F. C., SCHIRRU, R., “A new approach to use of genetic algorithm to solve the pressurized water reactor’s fuel management optimization problem”, ”, *Annals of Nuclear Energy*, v. 26, pp. 641-655, 1999.
- [36] YANG, J. E., HWANG, M. J., SUNG, T. Y., et al., “Application of genetic algorithm for reliability allocation in nuclear power plants”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 65, pp. 229-238, 1999.
- [37] LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A., MOL, A. C. A., “Maximization of a nuclear system availability through maintenance scheduling optimization using a genetic algorithm”, *Nuclear Engineering and Design*, v. 196, pp. 219-231, 2000.
- [38] LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A., FRUTUOSO E MELO, P. F., “An Application of Genetic Algorithm to Surveillance Test Optimization of a PWR Auxiliary Feedwater System”, *International Journal of Intelligent Systems*, v. 17, pp. 813-831, 2002.
- [39] MARTORELL, S., CARLOS, S., SÁNCHEZ, A., et al., “Constrained optimization of test intervals using a steady-state genetic algorithm”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 67, pp. 215-232, 2000.
- [40] JIEJUAN, T., DINGYUAN, M., DAZHI, X., “A genetic algorithm solution for a nuclear power plant risk–cost maintenance model”, *Nuclear Engineering and Design*, v. 229, pp. 81-89, 2004.
- [41] LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A., MELO, P. F. F., “Surveillance test policy optimization through genetic algorithms using non-periodic intervention frequencies and considering seasonal constraints”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 81, pp. 103-109, 2003.
- [42] MARTORELL, S., VILLANUEVA, J. F., CARLOS, S., et al., “RAMS + C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 87, pp. 65-75, 2005.

- [43] MARSEGUERRA, M., ZIO, E., MARTORELL, S., “Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 91, pp. 977-991, 2006.
- [44] MARTORELL, S., CARLOS, S., VILLANUEVA, J. F., et al., “Use of multiple objective evolutionary algorithms in optimizing surveillance requirements”, *Reliability Engineering and System Safety*, v. 91, pp. 1027-1038, 2006.
- [45] DAMASO, V. C., PEREIRA, C. M. N. A., MELO, P. F. F. F., “Aplicação de algoritmos genéticos à otimização integrada da disponibilidade de sistemas de segurança”. *International Nuclear Atlantic Conference - XIV ENFIR*, 1373, 1 CD-ROM, Santos, São Paulo, Brazil, 28 August – 02 September 2005.
- [46] DAMASO, V. C., PEREIRA, C. M. N. A., MELO, P. F. F. F., “Uma modelagem matemática para o cálculo da disponibilidade de componentes de sistemas”, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, v.22 - 3º Quadrimestre de 2005, pp. 4-13, 2005.
- [47] STARK, P. A., *Introdução aos Métodos Numéricos*. 1 ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência Ltda., 1984.
- [48] WOLFRAM MATHWORLD. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com>. Acesso em: 26 set 2006.
- [49] SHENK, A., *Cálculo e geometria analítica- volume 1*. 2 ed. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1985.
- [50] DAMASO, V. C., PEREIRA, C. M. N. A., MELO, P. F. F. F., “Aplicação de algoritmos genéticos a um modelo matemático para cálculo de disponibilidade de sistemas”. *VIII Encontro de Modelagem Computacional*, A9, 1 CD-ROM, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil, 23 – 25 Novembro 2005.
- [51] WARD SYSTEMS GROUP, INC. *GeneHunter User’s Manual*, 1 ed. USA, Ward Systems Group, Inc., 1995.

- [52] ELETRONUCLEAR. *Sistemas Básicos de Usinas Nucleares – SBUN – Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle – ASC*, fevereiro 1998.
- [53] ELETRONUCLEAR. *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – CFOL – Sistema de Ar Condicionado da Sala de Controle – ASC*, agosto 2002.
- [54] SIQUEIRA, S. B., *Tese de Doutorado (COPPE)*. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por [damaso@ctex.eb.br](mailto:damaso@ctex.eb.br) em 21 nov 2006.
- [55] SIQUEIRA, S. B., *Tese de Doutorado (COPPE)*. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por [damaso@ctex.eb.br](mailto:damaso@ctex.eb.br) em 22 nov 2006.

## Apêndice A

### – Conjunto de Soluções para o Sistema Hipotético –

Para o tratamento do problema de otimização foi construída uma planilha utilizando o software Microsoft® Excel 2000 tendo como suplemento o software GeneHunter™ [51] para execução do algoritmo genético. As soluções ótimas foram obtidas por meio de busca exaustiva, que incluiu como objetos de interesse as seguintes grandezas: o ganho,  $F_{obj}$ , dado pela Eq.3.12; a disponibilidade média do sistema,  $A_{SIS}^*(T_f)$ , dada pela Eq.3.6; os custos totais do sistema,  $C_{T,SIS}$ , equivalente à soma dos custos totais de cada componente, dados pelas Eq.3.7 e Eq.3.8; os custos de aquisição do sistema,  $C_{A,SIS}$ , correspondente à soma dos custos de aquisição dos componentes.

Quando uma solução “S<sub>1</sub>” qualquer é superada em um de seus parâmetros por uma outra solução “S<sub>2</sub>” (por exemplo, maior disponibilidade ou menor custo total) e superada ou igualada nos demais parâmetros por esta mesma solução “S<sub>2</sub>”, diz-se que a solução “S<sub>1</sub>” é dominada pela “S<sub>2</sub>”. Em outras palavras, para que uma solução seja dominada é necessário que exista alguma outra solução que a supere em pelo menos um parâmetro e não lhe seja inferior nos demais.

Na busca de um conjunto de soluções não dominadas para o sistema hipotético foram utilizadas nove configurações distintas para modelar o AG. O software permite registrar até as 250 melhores soluções obtidas por rodada. Posteriormente, as soluções não dominadas foram sistematicamente separadas. Os parâmetros de entrada que são comuns a todas as configurações são relacionados na Tabela A.1.

Tabela A.1. Parâmetros do AG comuns a todas as configurações.

Tipo de cromossomo	Contínuo / inteiro
Dimensão do cromossomo	16-bit *
Taxa de recombinação ( <i>crossover rate</i> )	0,90
Intervalo de geração ( <i>generation gap</i> )	0,98
Elitismo	Sim
Diversidade	Sim
Critério de interrupção da evolução	Melhor aptidão ( <i>fitness</i> ) inalterada após 50 gerações

\* Na verdade, quando se opta por cromossomo contínuo inteiro, a dimensão do cromossomo é automaticamente selecionada para 16 bits.

Os demais parâmetros, que não foram comuns a todas as configurações, são detalhados na Tabela A.2. Um esclarecimento é importante: o fator de distribuição  $\beta$ , que é uma variável contínua, teve seus valores discretizado em centésimos dentro de seus limites,  $0 \leq \beta \leq 1$ . Isso permite ao AG tratar esse fator como um cromossomo do tipo contínuo/inteiro. Dessa forma o AG escolhe um valor entre 0 e 100 e a planilha de cálculo faz a divisão por 100, chegando ao valor de  $\beta$ .

Tabela A.2. Configurações utilizadas do AG.

<b>Configuração</b>	<b>População</b>	<b>Taxa de Mutação</b>	<b>Amplitudes</b>
1	150	0,02	$0 \leq n \leq 30$ $70 \leq \beta \leq 100$
2	150	0,05	$0 \leq n \leq 30$ $70 \leq \beta \leq 100$
3	300	0,03	$0 \leq n \leq 30$ $70 \leq \beta \leq 100$
4	300	0,03	$0 \leq n \leq 30$ $70 \leq \beta \leq 100$
5	300	0,02	$0 \leq n \leq 30$ $70 \leq \beta \leq 100$
6	200	0,02	$0 \leq n \leq 20$ $80 \leq \beta \leq 100$
7	200	0,02	$0 \leq n \leq 15$ $90 \leq \beta \leq 100$
8	100	0,02	$0 \leq n \leq 15$ $90 \leq \beta \leq 100$
9	100	0,02	$0 \leq n \leq 15$ $90 \leq \beta \leq 100$

Algumas configurações incluem, ainda, restrições distintas:

- 1) Configuração 6: sem redundância para os componentes C, D e E; sem manutenção preventiva para os componentes C e E.
- 2) Configuração 7: sem redundância para os componentes C, D e E; sem manutenção preventiva para os componentes C e E.
- 3) Configurações 8: sem redundância para os componentes C, D e E; sem manutenção preventiva para os componentes C e E; componente D sofre 1 manutenção preventiva.
- 4) Configuração 9: sem subsistema D; sem redundância e sem manutenção preventiva para os componentes C e E.

Essa abordagem gerou um conjunto de 168 soluções não dominadas, que serve como apoio à tomada de decisão, suportado por informações pertinentes aos custos de aquisição, aos custos totais e à disponibilidade. Tais informações são relevantes quando a opção final a ser adotada está sujeita a restrições, sejam de cunho orçamentário, de requisitos técnicos ou de segurança. Essas soluções são mostradas no Apêndice B.

Do conjunto das soluções obtidas, destacaram-se subconjuntos de soluções que são não dominadas quando se considera apenas dois objetos de interesse por vez. Desta forma, obtém-se uma percepção da relação direta que há entre cada uma das grandezas  $A_{SIS}^*(T_f)$ ,  $C_{T,SIS}$  e  $C_{A,SIS}$  com a  $F_{obj}$ . Os seguintes pares foram analisados:  $A_{SIS}^*(T_f) \times F_{obj}$  (22 soluções);  $C_{T,SIS} \times F_{obj}$  (26 soluções);  $C_{A,SIS} \times F_{obj}$  (10 soluções). Nas Figuras A.1 a A.3 estão plotadas as 168 soluções e destacadas as soluções não dominadas para cada par considerado. Na Figura A.1 é mostrada a relação  $A_{SIS}^*(T_f) \times F_{obj}$ , na Figura A.2 a relação  $C_{T,SIS}^{-1} \times F_{obj}$  e na Figura A.3 a relação  $C_{A,SIS}^{-1} \times F_{obj}$ .

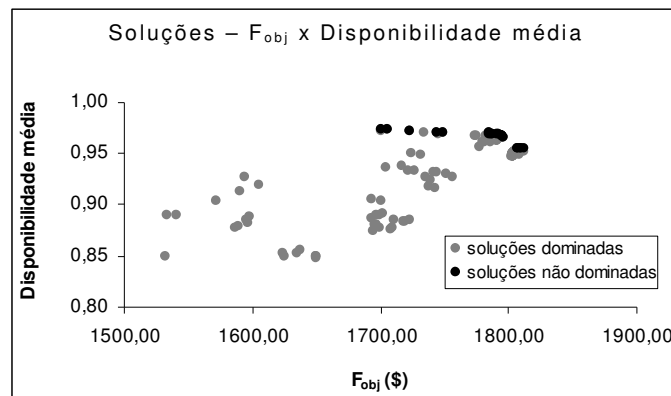


Figura A.1. Relação entre o par de objetivos  $A_{SIS}^*(T_f) \times F_{obj}$ .

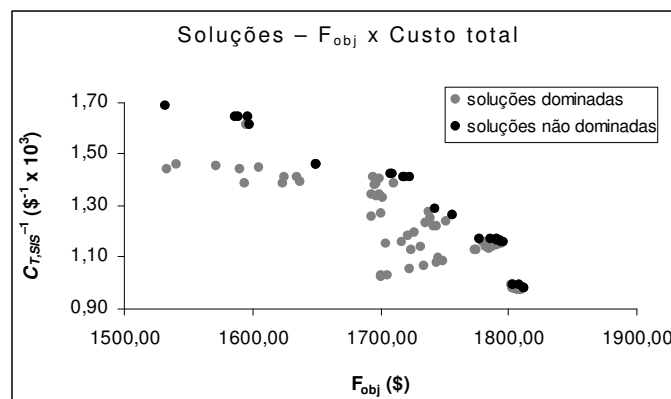


Figura A.2. Relação entre o par de objetivos  $C_{T,SIS}^{-1} \times F_{obj}$ .





## Apêndice B

### – Soluções Não Dominadas do Sistema Hipotético –

A Tabela B.1 lista as 168 soluções não dominadas, informando o valor para os quatro parâmetros de interesse, relacionando cada um deles à configuração do AG com que foi obtido, conforme descrito no Apêndice A.

Tabela B.1. Soluções não dominadas obtidas na otimização integrada do sistema hipotético.

Solução	$F_{obj}$	$C_{T,SIS}$	$C_{A,SIS}$	$A_{SIS}^*(T_f)$	Configuração do AG
1	1811,67	1022,55	475,00	0,9544	8
2	1811,56	1017,48	475,00	0,9526	8
3	1811,42	1019,75	475,00	0,9533	8
4	1811,36	1019,74	475,00	0,9533	8
5	1811,26	1019,72	475,00	0,9533	8
6	1811,11	1019,70	475,00	0,9532	8
7	1811,06	1021,85	475,00	0,9539	8
8	1811,05	1018,69	475,00	0,9529	8
9	1811,04	1018,69	475,00	0,9529	8
10	1810,94	1021,78	475,00	0,9539	8
11	1810,81	1020,84	475,00	0,9535	8
12	1810,69	1019,62	475,00	0,9530	8
13	1810,61	1018,65	475,00	0,9527	8
14	1810,18	1023,52	475,00	0,9542	8
15	1810,08	1025,06	475,00	0,9547	7
16	1810,07	1025,04	475,00	0,9547	7
17	1810,06	1025,04	475,00	0,9547	7
18	1809,93	1024,12	475,00	0,9543	7
19	1809,88	1023,43	475,00	0,9541	8
20	1809,73	1026,10	475,00	0,9549	7
21	1809,71	1021,63	475,00	0,9534	7
22	1809,70	1020,85	475,00	0,9531	7
23	1809,64	1021,61	475,00	0,9534	7
24	1809,62	1021,75	475,00	0,9534	7
25	1809,57	1025,02	475,00	0,9545	7
26	1809,56	1023,61	475,00	0,9540	7
27	1809,48	1023,47	475,00	0,9539	7
28	1809,46	1022,01	475,00	0,9534	7
29	1809,12	1022,87	475,00	0,9536	7
30	1809,09	1023,33	475,00	0,9538	7
31	1808,95	1008,13	468,00	0,9486	6
32	1808,29	1015,28	475,00	0,9508	8
33	1808,03	1016,40	475,00	0,9511	8

Tabela B.1.(continuação)

Solução	$F_{obj}$	$C_{T,SIS}$	$C_{A,SIS}$	$A_{SIS}^*(T_f)$	Configuração do AG
34	1807,82	1017,32	475,00	0,9513	7
35	1807,50	1016,34	475,00	0,9509	7
36	1807,49	1017,22	475,00	0,9512	7
37	1807,30	1016,28	475,00	0,9508	8
38	1807,19	1028,89	475,00	0,9550	8
39	1806,97	1029,21	475,00	0,9550	7
40	1806,96	1028,95	475,00	0,9549	7
41	1806,91	1016,17	475,00	0,9506	7
42	1804,79	1017,69	475,00	0,9504	6
43	1804,78	1017,60	475,00	0,9504	6
44	1804,74	1017,85	475,00	0,9504	6
45	1804,73	1017,77	475,00	0,9504	6
46	1804,58	1016,55	475,00	0,9500	6
47	1804,54	1011,81	468,00	0,9483	1
48	1804,52	1020,62	475,00	0,9513	6
49	1804,46	1020,56	475,00	0,9513	6
50	1804,31	1016,46	475,00	0,9498	6
51	1804,31	1021,62	475,00	0,9516	6
52	1804,27	1021,54	475,00	0,9515	6
53	1804,23	1021,61	475,00	0,9515	6
54	1804,22	1017,46	475,00	0,9501	6
55	1804,19	1021,53	475,00	0,9515	6
56	1803,94	1011,55	468,00	0,9481	1
57	1803,90	1008,15	468,00	0,9469	6
58	1803,89	1008,06	468,00	0,9469	6
59	1803,77	1011,26	468,00	0,9479	1
60	1803,74	1010,96	468,00	0,9478	1
61	1803,69	1018,83	468,00	0,9504	1
62	1803,65	1010,60	468,00	0,9476	1
63	1803,58	1018,54	468,00	0,9503	1
64	1803,52	1010,85	468,00	0,9477	1
65	1803,44	1017,99	468,00	0,9501	1
66	1803,44	1013,20	468,00	0,9484	1
67	1803,43	1018,32	468,00	0,9502	1
68	1803,35	1016,27	468,00	0,9495	1
69	1803,23	1017,50	468,00	0,9498	1
70	1803,05	1015,86	468,00	0,9492	1
71	1803,01	1015,03	468,00	0,9489	1
72	1802,78	1008,41	468,00	0,9466	1
73	1795,57	861,78	405,00	0,9664	9
74	1794,77	864,18	405,00	0,9670	9
75	1794,70	864,26	405,00	0,9670	9
76	1794,69	864,26	405,00	0,9670	9
77	1794,69	864,27	405,00	0,9670	9
78	1794,68	864,06	405,00	0,9669	9

Tabela B.1.(continuação)

Solução	$F_{obj}$	$C_{T,SIS}$	$C_{A,SIS}$	$A_{SIS}^*(T_f)$	Configuração do AG
79	1794,60	863,13	405,00	0,9665	9
80	1794,57	862,36	405,00	0,9662	9
81	1794,47	867,35	405,00	0,9680	9
82	1794,26	862,31	405,00	0,9661	9
83	1794,17	861,35	405,00	0,9657	9
84	1794,13	861,34	405,00	0,9657	9
85	1794,06	860,46	405,00	0,9654	9
86	1794,00	861,31	405,00	0,9657	9
87	1792,65	869,75	405,00	0,9682	9
88	1792,20	866,87	405,00	0,9670	9
89	1791,30	871,35	405,00	0,9683	9
90	1791,24	857,65	405,00	0,9633	9
91	1791,18	859,41	405,00	0,9639	9
92	1790,98	856,30	405,00	0,9627	9
93	1790,96	858,50	405,00	0,9635	9
94	1786,75	876,56	410,00	0,9686	3
95	1786,69	876,66	410,00	0,9686	3
96	1786,08	855,74	405,00	0,9607	2
97	1785,58	878,75	410,00	0,9689	3
98	1785,53	877,59	410,00	0,9686	3
99	1785,45	877,73	410,00	0,9686	3
100	1784,90	880,70	410,00	0,9694	3
101	1784,89	881,85	410,00	0,9698	3
102	1784,71	879,65	410,00	0,9689	3
103	1784,61	880,66	410,00	0,9693	3
104	1784,50	868,19	405,00	0,9647	2
105	1782,16	878,11	405,00	0,9678	2
106	1781,98	874,68	405,00	0,9661	2
107	1780,60	861,32	405,00	0,9608	2
108	1780,37	862,76	405,00	0,9612	2
109	1776,82	855,67	405,00	0,9574	2
110	1774,60	887,56	405,00	0,9681	2
111	1774,16	887,24	405,00	0,9682	2
112	1756,75	792,79	350,00	0,9272	2
113	1751,59	808,30	355,00	0,9310	1
114	1748,48	920,05	425,00	0,9705	1
115	1744,91	912,57	405,00	0,9687	1
116	1743,99	926,32	440,00	0,9711	1
117	1743,59	819,06	355,00	0,9320	1
118	1743,21	778,33	350,00	0,9170	2
119	1740,89	818,14	355,00	0,9316	2
120	1738,98	800,89	350,00	0,9245	1
121	1737,28	785,37	350,00	0,9174	2
122	1735,57	811,90	350,00	0,9264	1
123	1734,64	935,31	420,00	0,9710	1

Tabela B.1.(continuação)

Solução	$F_{obj}$	$C_{T,SIS}$	$C_{A,SIS}$	$A_{SIS}^*(T_f)$	Configuração do AG
124	1731,12	876,47	390,00	0,9483	1
125	1726,07	836,61	365,00	0,9330	2
126	1724,60	888,84	398,00	0,9511	1
127	1723,01	948,56	439,00	0,9715	1
128	1722,54	710,36	295,00	0,8848	5
129	1721,59	846,82	365,00	0,9340	2
130	1719,65	710,18	295,00	0,8837	5
131	1718,40	710,09	295,00	0,8832	5
132	1716,47	862,63	383,00	0,9379	2
133	1710,17	721,39	295,00	0,8849	5
134	1709,03	702,61	290,00	0,8770	5
135	1707,57	701,79	290,00	0,8762	5
136	1706,17	969,56	455,00	0,9731	2
137	1703,82	866,47	375,00	0,9359	1
138	1701,76	750,78	310,00	0,8919	2
139	1700,71	970,31	438,00	0,9714	2
140	1700,26	974,86	443,00	0,9735	2
141	1700,21	786,41	330,00	0,9045	4
142	1699,46	745,82	305,00	0,8893	5
143	1699,39	713,14	290,00	0,8780	5
144	1697,50	747,86	305,00	0,8893	5
145	1697,43	720,24	290,00	0,8807	5
146	1695,64	723,99	294,00	0,8810	5
147	1694,38	709,62	290,00	0,8743	2
148	1693,56	745,69	305,00	0,8871	5
149	1692,91	796,40	330,00	0,9053	2
150	1650,07	684,50	275,00	0,8490	5
151	1649,96	683,58	275,00	0,8486	5
152	1649,86	685,75	275,00	0,8494	5
153	1638,05	717,13	285,00	0,8565	5
154	1635,06	709,20	283,00	0,8525	5
155	1624,57	709,99	282,00	0,8494	5
156	1623,89	720,95	285,00	0,8527	4
157	1605,50	692,10	302,00	0,9190	4
158	1598,31	620,76	247,00	0,8876	5
159	1596,06	608,72	242,00	0,8819	5
160	1595,21	619,28	247,00	0,8858	5
161	1594,61	721,90	307,00	0,9266	4
162	1589,85	695,02	297,00	0,9139	4
163	1589,14	608,70	242,00	0,8791	5
164	1586,81	608,62	242,00	0,8782	5
165	1571,41	688,24	297,00	0,9039	4
166	1540,80	684,01	267,00	0,8899	4
167	1533,08	692,88	270,00	0,8904	4
168	1532,15	593,48	227,00	0,8502	4

## Apêndice C

### – Conjunto de Soluções para o Sistema ASC –

Para o tratamento do problema de otimização foi construída uma planilha utilizando o software Microsoft® Excel 2000 tendo como suplemento o software GeneHunter™ [51] para execução do algoritmo genético. Os focos de otimização foram a disponibilidade média do sistema no período considerado, descrita no Capítulo 5, item 5.4, e os custos totais do sistema, correspondente à soma dos custos de tramos e componentes conforme a Eq.2.41.

Um conjunto de soluções não dominadas foi obtido por meio do emprego sucessivo de diferentes funções de avaliação e mantendo a configuração dos parâmetros do AG. Tal procedimento tem por objetivo ampliar o campo de busca do AG e permitir que sejam encontradas soluções em diferentes setores da região factível. A configuração adotada para o AG está detalhada na Tabela C.1 e os valores das grandezas tratadas na otimização, juntamente com as configurações sugeridas para o sistema ASC, são listadas no Apêndice D.

Tabela C.1. Parâmetros do AG para otimização do Sistema ASC.

Tipo de cromossomo	Contínuo / inteiro
População	300 indivíduos
Dimensão do cromossomo	16-bit *
Taxa de recombinação ( <i>crossover rate</i> )	0,90
Taxa de mutação ( <i>mutation rate</i> )	0,01
Intervalo de geração ( <i>generation gap</i> )	0,98
Elitismo	Sim
Diversidade	Sim
Critério de interrupção da evolução	Melhor aptidão ( <i>fitness</i> ) inalterada após um número $g^{**}$ de gerações
Amplitudes ( <i>ranges</i> )	$0 \leq n \leq 60$ $95 \leq \beta \leq 100$ $-1 \leq d \leq 1$

\* Na verdade, quando se opta por cromossomo contínuo inteiro, a dimensão do cromossomo é automaticamente selecionada para 16 bits.

\*\* Algumas buscas foram feitas com  $g = 75$  e outras com  $g = 100$ .

Como ponto de partida para a definição das funções de avaliação, observou-se uma configuração com o máximo de tramos e componentes para os subsistemas existentes, ou seja, três tramos funcionais de refrigeração, duas unidades de filtragem e três ventiladores reforçadores. Manteve-se a periodicidade atual de manutenções preventivas e testes, que são: a cada três meses para o subsistema de refrigeração, a cada seis meses para o subsistema de ventiladores e a cada dezoito meses para o subsistema de filtragem. Nessas condições, a disponibilidade média do Sistema ASC fica em 0,9258 e os custos totais em torno de R\$4.000.000,00. As funções de avaliação utilizadas foram as seguintes:

$$F_{obj,1}: \text{maximizar } A_{ASC}^*(T_f) \cdot (4.000.000,00 - C_{T,ASC}),$$

$$F_{obj,2}: \text{maximizar } (A_{ASC}^*(T_f) - 0,9258) \cdot (4.000.000,00 - C_{T,ASC}) \text{ e}$$

$$F_{obj,3}: \text{maximizar } A_{ASC}^* \text{ e minimizar } C_{T,ASC},$$

onde  $A_{ASC}^*(T_f)$  é a disponibilidade média do Sistema ASC no período de operação,  $T_f$ , e  $C_{T,ASC}$  são os custos totais com o Sistema ASC. No caso da  $F_{obj,3}$ , utilizou-se o recurso do software que permite a definição de múltiplas funções objetivo.

A Figura C.1 representa graficamente o conjunto de soluções obtidas, representando a disponibilidade média do sistema versus o inverso dos custos totais com o Sistema ASC, destacando as soluções não dominadas.

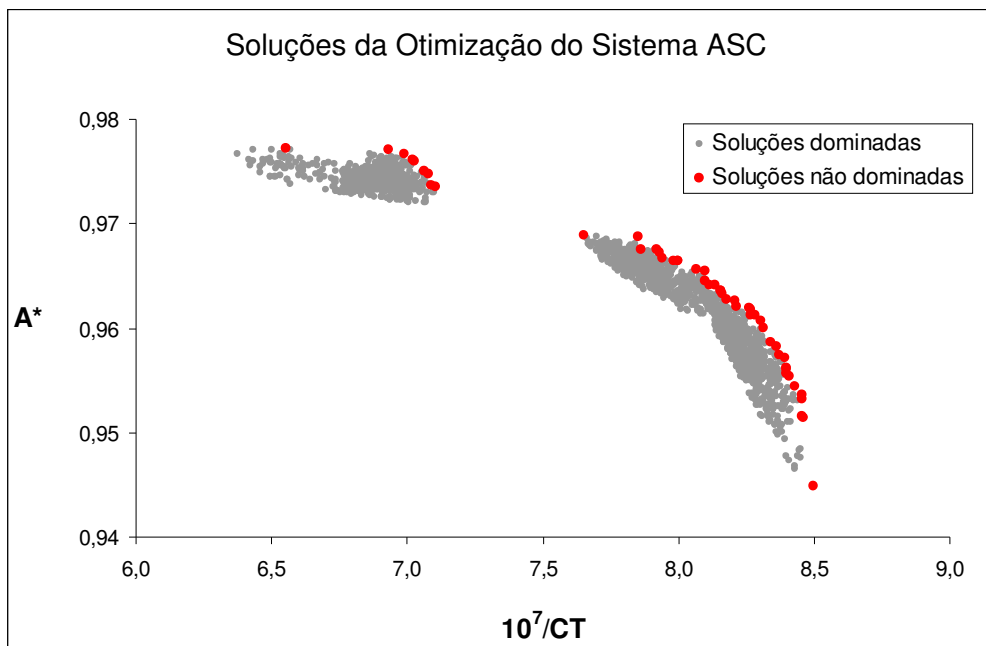


Figura C.1. Conjunto de soluções obtidas pelo AG para o Sistema ASC.

Neste estudo, o foco foi analisar as opções de estrutura do Sistema ASC em função das soluções obtidas pelo AG, buscando indicativos de tendências de configurações com maior aptidão. Não foi imposta nenhuma restrição à busca de soluções, senão as próprias faixas para cada variável, conforme descrito na Tabela C.1. Dessa forma, foi possível ter maior compreensão da dinâmica do sistema e da forma de interação entre os diferentes subsistemas. É importante enfatizar que os resultados obtidos nesse processo permitem uma análise em bases comparativas, com caráter predominantemente qualitativo.

A relação direta entre a disponibilidade e os custos totais fica evidente ao observar a Figura C.1. Esse comportamento é esperado, pois, em geral, o aumento de disponibilidade é implementado por inclusão de novos componentes e/ou por meio de manutenções preventivas e testes. Porém, essa relação nem sempre é tão direta, e aqui se tem um exemplo claro. Conforme se pode verificar no Apêndice D, a totalidade das soluções apresentadas prevê a instalação do subsistema de água gelada. Embora as soluções estejam diretamente vinculadas à função de avaliação escolhida, esse fato é um indicativo forte do benefício que a implantação de refrigeração por água gelada traria ao Sistema ASC. No entanto, a melhoria observada se dá por uma forma contrária ao senso comum: a simples inclusão do subsistema de água gelada produz uma queda na disponibilidade média do sistema e reduz os custos totais. O decréscimo na disponibilidade é explicado pelo fato do subsistema de refrigeração passar a ficar em reserva a partir da instalação do subsistema de água gelada, o que gera a possibilidade de ocorrer falhas que não sejam reveladas e portanto não sujeitas à imediata ação corretiva. Como a disponibilidade do Sistema ASC não considera o subsistema de água gelada, ocorre a queda na disponibilidade. Para contornar esse fator adverso, ou ao menos minimizá-lo, deve-se adequar o planejamento de manutenções preventivas à nova configuração. A redução nos custos totais ocorre porque a diminuição dos gastos com manutenção corretiva, devido ao fato do subsistema de refrigeração ser poupado pela inclusão do subsistema de água gelada, é maior que os custos referentes a este último.

Os resultados indicam, também, que os custos com a inclusão de um terceiro tramo funcional no subsistema de refrigeração não compensa em termos de relação custo/benefício. Uma segunda unidade de filtragem, porém, mostra-se extremamente vantajosa, pois a ausência de redundância para esse componente torna vulnerável a disponibilidade do sistema.

Ao se observar a Figura C.1, distingue-se nitidamente duas regiões de concentração de soluções. A região relacionada aos custos mais elevados engloba as soluções que previram um terceiro ventilador reforçador no subsistema de ventiladores, enquanto a outra região contém as soluções que mantêm somente dois ventiladores. Como há soluções que indicam vantagens na adoção de um terceiro ventilador reforçador, deve-se estudar essa possibilidade com atenção.



## Apêndice D

### – Soluções Não Dominadas do Sistema ASC –

A Tabela D.1 lista 49 soluções não dominadas obtidas no estudo descrito no Apêndice C, informando os valores das grandezas tratadas na otimização, juntamente com as configurações para o sistema ASC, e relacionando cada uma delas à função de avaliação com que foi obtida.

Tabela D.1. Soluções não dominadas obtidas na otimização integrada do Sistema ASC.

Solução	$A_{ASC}^*(T_f)$	$C_{T,ASC}$	$F_{obj}$	Nº tramos/componentes			
				SSA	SSR	SSF	SSV
1	0,9563	R\$ 1.191.319,54	1	1	2	2	2
2	0,9554	R\$ 1.189.389,54	1	1	2	2	2
3	0,9558	R\$ 1.191.061,55	1	1	2	2	2
4	0,9641	R\$ 1.229.816,64	1	1	2	2	2
5	0,9656	R\$ 1.235.383,43	1	1	2	2	2
6	0,9645	R\$ 1.235.263,69	1	1	2	2	2
7	0,9572	R\$ 1.191.770,93	1	1	2	2	2
8	0,9582	R\$ 1.196.536,52	1	1	2	2	2
9	0,9561	R\$ 1.191.122,19	1	1	2	2	2
10	0,9601	R\$ 1.202.831,13	1	1	2	2	2
11	0,9532	R\$ 1.183.115,65	1	1	2	2	2
12	0,9516	R\$ 1.182.857,27	1	1	2	2	2
13	0,9626	R\$ 1.218.655,75	1	1	2	2	2
14	0,9636	R\$ 1.226.160,51	1	1	2	2	2
15	0,9537	R\$ 1.183.181,80	1	1	2	2	2
16	0,9607	R\$ 1.204.385,35	1	1	2	2	2
17	0,9574	R\$ 1.195.153,90	1	1	2	2	2
18	0,9544	R\$ 1.186.859,72	1	1	2	2	2
19	0,9587	R\$ 1.199.400,09	1	1	2	2	2
20	0,9613	R\$ 1.208.059,36	1	1	2	2	2
21	0,9620	R\$ 1.210.410,56	1	1	2	2	2
22	0,9618	R\$ 1.210.375,60	1	1	2	2	2
23	0,9515	R\$ 1.181.997,42	1	1	2	2	2
24	0,9628	R\$ 1.223.483,13	1	1	2	2	2
25	0,9642	R\$ 1.233.015,77	1	1	2	2	2
26	0,9449	R\$ 1.176.907,13	1	1	2	2	2
27	0,9773	R\$ 1.525.742,72	2	2	2	3	2
28	0,9751	R\$ 1.415.806,67	2	1	2	3	2
29	0,9748	R\$ 1.412.698,47	2	1	2	3	2
30	0,9736	R\$ 1.407.680,52	2	1	2	3	2
31	0,9737	R\$ 1.410.739,63	2	1	2	3	2

Tabela D.1.(continuação)

Solução	$A_{ASC}^*(T_f)$	$C_{T,ASC}$	Tipo $F_{obj}$	Nº tramos/componentes			
				SSA	SSR	SSF	SSV
32	0,9772	R\$ 1.443.125,13	2	1	2	3	2
33	0,9767	R\$ 1.430.938,08	2	1	2	3	2
34	0,9761	R\$ 1.424.556,03	2	1	2	3	2
35	0,9761	R\$ 1.423.337,44	2	1	2	3	2
36	0,9665	R\$ 1.253.370,17	3	1	2	2	2
37	0,9673	R\$ 1.261.100,49	3	1	2	2	2
38	0,9637	R\$ 1.226.372,19	3	1	2	2	2
39	0,9621	R\$ 1.217.556,02	3	1	2	2	2
40	0,9656	R\$ 1.239.918,17	3	1	2	2	2
41	0,9668	R\$ 1.259.338,47	3	1	2	2	2
42	0,9634	R\$ 1.225.416,55	3	1	2	2	2
43	0,9689	R\$ 1.306.910,02	3	1	2	2	2
44	0,9664	R\$ 1.250.761,89	3	1	2	2	2
45	0,9664	R\$ 1.250.722,65	3	1	2	2	2
46	0,9676	R\$ 1.263.408,66	3	1	2	2	2
47	0,9688	R\$ 1.274.306,13	3	1	2	2	2
48	0,9676	R\$ 1.272.183,97	3	1	2	2	2
49	0,9614	R\$ 1.210.197,09	3	1	2	2	2

## Apêndice E

### – Planejamento de Intervenções para o Sistema ASC –

A Tabela E.1 esquematiza o planejamento de intervenções (manutenções preventivas e testes) para todos os tramos funcionais e componentes do Sistema ASC, determinado pela solução de melhor aptidão, conforme descrito no Capítulo 6, item 6.3.

Tabela E.1. Planejamento de Intervenções para o Sistema ASC.

Mês	ASC								
	SSA			SSR		SSF		SSV	
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 1	Tramo 2	Unidade 1	Unidade 2	Ventilador 1	Ventilador 2
1				X					
2					X	X		X	
3				X			X		X
4	X				X			X	
5		X		X		X			X
6			X		X		X	X	
7	X			X					X
8		X			X	X		X	
9			X	X			X		X
10	X				X			X	
11		X		X		X			X
12			X		X		X	X	
13	X			X					X
14		X			X	X		X	
15			X	X			X		X
16	X				X			X	
17		X		X		X			X
18			X		X		X	X	
19	X			X					X
20		X			X	X		X	
21			X	X			X		X
22	X				X			X	
23		X		X		X			X
24			X		X		X	X	
25	X			X					X

Mês	ASC								
	SSA			SSR		SSF		SSV	
	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 1	Tramo 2	Unidade 1	Unidade 2	Ventilador 1	Ventilador 2
26		X			X	X		X	
27			X	X			X		X
28	X				X			X	
29		X		X		X			X
30			X		X		X	X	
31	X			X					X
32		X			X	X		X	
33			X	X			X		X
34	X				X			X	
35		X		X		X			X
36			X		X		X	X	
37	X			X					X
38		X			X	X		X	
39			X	X			X		X
40	X				X			X	
41		X		X		X			X
42			X		X		X	X	
43	X			X					X
44		X			X	X		X	
45			X	X			X		X
46	X				X			X	
47		X		X		X			X
48			X		X		X	X	
49	X			X					X
50		X			X	X		X	
51			X	X			X		X
52	X				X			X	
53		X		X		X			X
54			X		X		X	X	
55	X			X					X
56		X			X	X		X	
57			X	X			X		X
58	X				X			X	
59		X							X
60									