

OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PLANEJAMENTO DE POLÍTICAS DE TESTES EM
SISTEMAS NUCLEARES POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Newton Norat Siqueira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO INSTITUTO DE ENGENHARIA
NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE
PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE REATORES.

Aprovada por:

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D. Sc.
(Orientador)

Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D. Sc.
(Orientador)

Prof. Antônio Carlos de Abreu Mol, D. Sc.

Prof. Wagner Figueiredo Sacco, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2006

SIQU Siqueira, Newton Norat

Otimização aplicada ao planejamento de políticas de testes em sistemas nucleares por enxame de partículas / Newton Norat Siqueira – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2007.

69 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, 2007.

1. Testes Periódicos. 2. Manutenção Preventiva. 3. Otimização por Enxame de Partículas. I. Título.

CDD

CDU

À Dinorah, minha mãe, única e muito amada, responsável por depositar em mim os genes da determinação.

Ao Jazon, meu pai e conselheiro, aquele cujo honra, foi por Jesus adicionada em demasia, resplandecendo nos demais homens da família.

À Ana Luísa, minha sobrinha, ela que representa a união das famílias Norat Siqueira e Santos, através de Helen e Matheus.

Ao Wilen, simplista complexo erudito irmão caçula, confundido pelo reflexo dele em mim, pensando que são por meus ensinamentos o sua brilhante vida, quando na verdade sou dele aprendiz.

À minha esposa Lívia e à minha filhinha Gabriela ainda guardada no ventre da mamãe.

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos Patrick Siani e Rodrigo Feitosa que representam a amizade incondicional, aquela que existe pelo amor ao próximo sem temor à decepção, sem espera de reciprocidade.

Aos “alunos professores” Milton Junior, Rafael Baptista, Josinaldo Azevedo e Cassiano, eles formam o “quarteto dinâmico” que me sustém até agora neste trabalho de tese, pois por eles permaneci no IEN, conclui os créditos, que eram praticamente impossíveis para um homem longe deles.

Aos orientadores Professores Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira e Celso Marcelo Franklin Lapa, pois com muita paciência garimparam e souberam polir a pedra bruta do conhecimento, escondida entre a minha pressa de “conquistar o mundo” e o estudo de Engenharia de Reatores Nucleares.

A todos os professores do IEN, especialmente ao Paulo Berquó de Sampaio, dono das aulas mais esclarecedoras que eu já tinha presenciado.

Aos companheiros de trabalho, Ruben Lopes, Luis Hernesto, Robson da Cruz, Ronaldo Rei e Jorge Mattos que me apóiam em todo este investimento acadêmico.

As empresas Embratel e TIM que me proveram neste período de dedicação ao curso de mestrado.

Resumo da Tese apresentada ao IEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PLANEJAMENTO DE POLÍTICAS DE TESTES EM SISTEMAS NUCLEARES POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Newton Norat Siqueira

Dezembro / 2006

Orientadores: Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Celso Marcelo Franklin Lapa

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho apresenta uma nova abordagem para resolução de problemas de maximização da disponibilidade em sistemas eletro-mecânicos, submetidos a políticas de testes periódicos para supervisão e inspeção. A nova abordagem utiliza ferramenta de otimização recém desenvolvida, Particle Swarm Optimization (PSO) criada por KENNEDY e EBERHART (2001), integrada a modelos probabilísticos.

São resolvidos dois problemas envolvendo otimização de políticas de manutenção, o primeiro utiliza um sistema eletromecânico clássico hipotético, e o segundo utiliza o sistema de geradores a diesel de emergência da planta nuclear de Angra 1.

Para ambos os casos, o PSO é comparado com o algoritmo genético (AG). Nos experimentos realizados, o PSO foi capaz de obter resultados comparáveis aos do AG, ou até, ligeiramente superiores. Entretanto, o algoritmo do PSO é mais simples e a convergência mais rápida, apontando para uma boa alternativa para solução desta classe de problemas.

Abstract of Thesis presented to IEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM APPLIED TO
NUCLEAR SYSTEMS SURVEILLANCE TEST PLANNING

Newton Norat Siqueira

December / 2006

Advisors: Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira

Celso Marcelo Franklin Lapa

Department: Nuclear Engineering

This work shows a new approach to solve availability maximization problems in electromechanical systems, under periodic preventive scheduled tests. This approach uses a new Optimization tool called PSO developed by KENNEDY and EBERHART (2001), Particle Swarm Optimization, integrated with probabilistic safety analysis model.

Two maintenance optimization problems are solved by the proposed technique, the first one is a hypothetical electromechanical configuration and the second one is a real case from a nuclear power plant (Emergency Diesel Generators).

For both problem PSO is compared to a genetic algorithm (GA). In the experiments made, PSO was able to obtain results comparable or even slightly better than those obtained by GA. Therefore, the PSO algorithm is simpler and its convergence is faster, indicating that PSO is a good alternative for solving such kind of problems.

SUMÁRIO

	Pág.
1.Introdução.....	13
1.1. Contextualização do problema.....	13
1.2.Objetivos.....	21
1.3. Contribuições.....	21
2.Modelo Probabilístico.....	22
2.1. Definição de Confiabilidade.....	22
2.2. Definição de Disponibilidade.....	26
2.3. Modelo probabilístico de testes periódicos em cálculos de disponibilidade.....	27
3. O Problema de otimização.....	34
3.1. Otimização Por Enxame de Partículas (PSO).....	34
3.2. Função Objetivo.....	40
4. Aplicação do Método.....	42
4.1. Agenda de testes periódicos em sistema eletromecânico.....	42
4.2. Agenda de testes periódicos em grupo gerador a diesel de emergência.....	47
4.3. Resultados obtidos.....	52

5. Conclusões e recomendações.....	57
7. Referências Bibliográficas.....	60

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura: 1.1-1 Curva da Banheira</i>	15
<i>Figura 2.3-1 - Curva dente de indisponibilidade total em forma dente de serra/escada</i>	33
<i>Figura 3.1-1 - Atualização de velocidade no PSO</i>	38
<i>Figura 3.1-2 - Pseudo-código PSO</i>	39
<i>Figura 4.1-1 - Sistema Eletromecânico hipotético</i>	43
<i>Figura 4.2-1 – Diagrama grupo Gerador a Diesel</i>	47
<i>Figura 4.3-1 - Convergência PSO x AG do sistema eletromecânico</i>	53
<i>Figura 4.3-2 - PSO x AG Convergência do GDE</i>	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1-1 Condições operacionais do estudo comparativo do sistema eletromecânico hipotético.	46
<i>Tabela 4.2-1 Condições Operacionais do Estudo Comparativo do GDE.</i>	51
<i>Tabela 4.3-1 - Parâmetros PSO x GA do sistema eletromecânico.</i>	52
<i>Tabela 4.3-2 - Resultados GA x PSO do sistema eletromecânico.</i>	53
<i>Tabela 4.3-3 - Agendas para o problema do sistema eletromecânico</i>	54
<i>Tabela 4.3-4 - Parâmetros GA x PSO do GDE.</i>	54
<i>Tabela 4.3-5 - Resultados GA x PSO do GDE.</i>	55
Tabela 4.3-6 - Agenda de Testes PSO do GDE.	55
<i>Tabela 4.3-7 - Agenda de Testes AG do GDE.</i>	56

SÍMBOLOS E NOMECLATURAS

$A(t)$ – disponibilidade de um componente que não tenha sofrido reparo ou teste até o instante t

$R(t)$ – confiabilidade de um componente que não tenha sofrido manutenção até o instante t

N – Número total de manutenções ou testes programados para uma missão

T_m – Intervalo entre manutenções periódicas

$R_m(t, T_m, N)$ – confiabilidade de um componente no instante t sujeito a N manutenções periódicas em intervalos T_m

$T_m(i)$ – tempos agendados para manutenção de um componente (i é o índice da manutenção e varia de 1 até ult , que é o número da última manutenção realizada até t)

$T_m(ult)$ – Tempo da realização da última manutenção até o instante t

$\Delta m(i)$ - tempo de desalinhamento necessário à i -ésima manutenção

$R_m[t, T_m(i), T_m(ult)]$ – não-confiabilidade de um componente no instante t sujeito a i manutenções realizadas nos instantes $T_m(i)$, sendo a última em $T_m(ult)$

Δt - tempo de desalinhamento necessário a um teste

$T_t(k)$ – tempos agendados para testes até o instante t (k é o índice do teste)

$A(t, T_t, N)$ – disponibilidade de um componente sujeito a N testes periódicos realizados durante a missão, em intervalos constantes de tempo T_t

T_{mis} – tempo total de uma missão

$\Delta r(k)$ - tempo de um reparo caso seja necessário relativo ao k -ésimo teste, k varia de 1 até N

$\Delta t(k)$ - tempo necessário ao k -ésimo teste, k varia de 1 até N

$A_t[t, T_t(k)]$ – disponibilidade de um componente no instante t sujeito a uma política de testes periódicos realizados nos tempos $T_t(k)$

$A_t[t-T_t(k)-1]$ - probabilidade do componente encontrar-se falho no instante imediatamente anterior ao k -ésimo teste

$A_t[t, T_t(k)]$ – indisponibilidade de um componente no instante t sujeito a uma política de testes periódicos realizados nos tempos $T_t(k)$

C_m – custo de manutenção de um componente

C_r – custo de reparo de um componente

CT – custo total de uma política de manutenções relativo ao intervalo entre os instantes $T(i)$ e $T(i+1)$

Z – número de trens paralelos

$S(V)$ - número de componentes em série no trem genérico V

V – índice do trem

Q – índice do componente em cada trem (Q varia de 1 até $S(V)$)

$E[Q, V]$ – evento referente à ocorrência da falha do componente Q do v -ésimo trem

$E[V]$ – evento referente à ocorrência de falha do v -ésimo trem

$A(t)_{sis}$ – indisponibilidade do sistema

$R(t)_{sis}$ - não confiabilidade do sistema

Z^* – número de trens paralelos não falhos restantes após um ou mais desalinhamentos

M - número mínimo de trens paralelos que devem estar disponíveis para o sistema não estar indisponível

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo é destinado a uma sucinta descrição do problema a ser resolvido nesta tese, apresentando em ordem cronológica uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais recentes da área de interesse. Ao final do capítulo serão identificados os objetivos da tese assim como as contribuições do trabalho.

1.1 Contextualização do Problema

A relação de compromisso entre o custo e benefício é na maioria dos casos um grande processo matemático complexo de ser resolvido, porém muito útil em processos de decisão, pois serve para codificar e quantizar índices de “sucesso” aos candidatos de uma solução dentro de um universo imenso de opções qualificadas de um dado problema. Para melhor ilustrar esta afirmação, destaca-se a estória dos pesquisadores de São que desejavam produzir uma caneta esferográfica capaz de escrever com gravidade zero, investiram o suficiente para produzir a melhor caneta do mundo, porém foram “surpreendidos” com o bom e velho lápis capaz de escrever com ou sem gravidade, e aliás, muito usado pelos astronautas Vermelhos.

O conto acima busca a reflexão sobre os conceitos de “ótimo” que polarizam a sociedade intelectual em dois grandes grupos: os indivíduos que tem poder de investimento, e sequer refletem sobre as soluções mais simples, e os que não possuem escolhas e usam a criatividade para buscar soluções.

Um outro tema motivador nesta tese, além do ponto de vista dos esforços dos pesquisadores em busca do ótimo, está nas empresas, que diariamente estão ampliando seus investimentos em tecnologia para atingir supremacia de mercado e alta satisfação de seus clientes. Esta crescente evolução tecnológica, seja por automação de sistemas e processos, ou diversidade de novos componentes, favorece a probabilidade de falhas, e conforme MOBLEY

e CASTRO (1999), “uma performance eficaz e efetiva de todos os processos produtivos depende de sistemas confiáveis, que operem no seu melhor nível de desempenho projetado”. Portanto é através deste parágrafo que se sintetiza a outra face deste trabalho, ou seja, evitar acidentes que possam comprometer a alta disponibilidade de uma instalação industrial, usando soluções otimizadas.

As falhas em equipamentos podem representar grandes perdas econômicas e humanas, apresentando, em muitos casos, comprometimentos significativos para a imagem institucional das empresas, conforme afirmação de BAPTISTA (2004): “em todos os segmentos industriais, os períodos de indisponibilidade dos equipamentos afetam a capacidade produtiva de uma empresa, aumentando os custos operacionais e, em consequência, interferindo na qualidade do produto final e no atendimento aos clientes”.

A preocupação com a qualidade de uma produção ou disponibilidade de sistemas, são vetores imprescindíveis para evitar acidentes comprometedores a humanidade, tais como: *Bhopal, Chernobyl, Challenger, Virginia Electric and Power Company, Three Miles Island (TMI)*. Essas ocorrências confirmam a relevância, nos dias de hoje, de considerarem-se estratégicos os aspectos de segurança e de conservação do meio ambiente na manutenção.

Dentro desta atmosfera de busca do ótimo, surgiu o conceito de otimização, utilizado em programas econômicos de redução de custos, também usado na matemática com a busca de pontos de máximo e mínimo de funções, e finalmente na engenharia com mais diversas aplicações.

Um importante exemplo de aplicação de otimização em Engenharia, são os problemas de maximização da disponibilidade média dos sistemas e/ou componentes submetidos a políticas de testes ou manutenção periódicos, que são objetos de estudo desta tese. Estas políticas são adotadas devido ao comportamento da evolução das taxas de falhas dos equipamentos industriais ativos.

Experimentos comprovam que existe uma seqüência de evolução semelhante das taxas de falha para equipamentos de diferentes naturezas, portanto é previsto que a taxa de falha seja elevada no início da vida operacional do equipamento devido ao efeito da “mortalidade infantil”, período onde a taxa de falha é alta e cai com a utilização do componente, este problema já está solucionado com a técnica de amaciamento dada pelos fabricantes, depois deste período, o componente entra na fase conhecida como “vida útil” onde sua taxa de falha fica praticamente constante, e por fim, devido ao desgaste operacional dos componentes, a taxa volta a crescer, caracterizando o envelhecimento do componente, este parágrafo pode ser resumido pela figura 1.1-1.

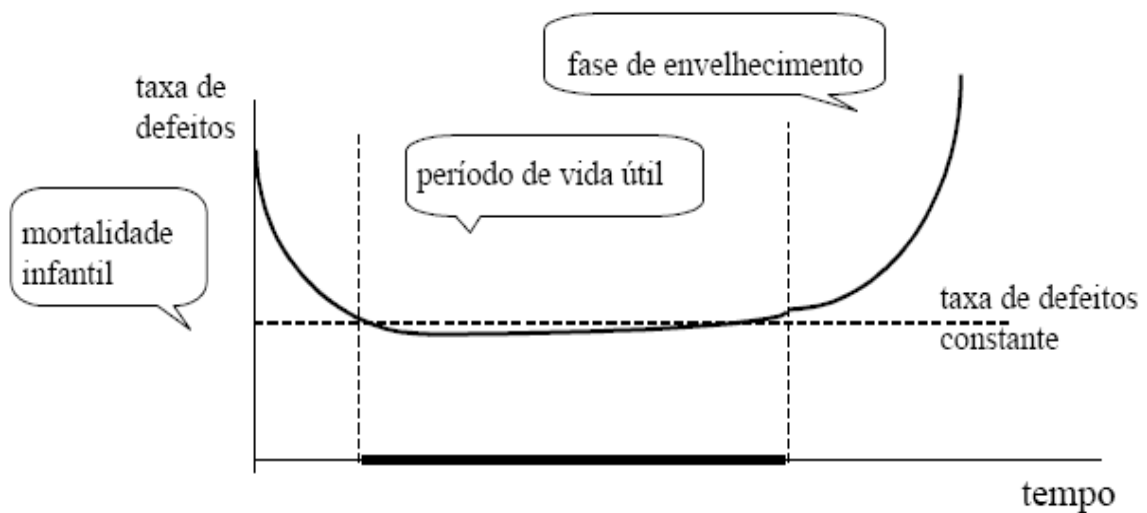


Figura: 1.1-1 Curva da Banheira

Segundo LAPA (2001b), medidas que minimizam as conseqüências dos efeitos do envelhecimento decorrente do uso são muito importantes para o bom e seguro funcionamento de qualquer instalação industrial, porém existe ainda um outro problema, não menos relevante, sobretudo para centrais nucleares, que é a ocorrência de falhas não reveladas. Isto se dá porque em sistemas onde se exige alta confiabilidade e segurança são utilizados

componentes redundantes, portanto, grande parte destes componentes está em modo de espera então ao falharem, suas falhas permanecem ocultas até que o sistema seja solicitado.

Com o intuito de minimizar a probabilidade de se encontrar um componente falho no momento de uma demanda real, são propostas medidas preventivas. Estas são agendas de testes periódicos, usadas para evidenciar a falha dos componentes que estão em modo de espera fria.

A relação de compromisso desta agenda está entre a raridade dos testes periódicos, e a sua alta frequência, portanto o problema agora não será tão somente a agenda, mas a otimização dela, de maneira a produzi-la nem tão rara, para não ocultar um componente falho e nem tão intensa, capaz de diminuir a disponibilidade média do sistema e produzir desgaste excessivo dos componentes, devido à severidade dos testes.

LAPA (2001b) motiva a pesquisa com o seguinte parágrafo: “Dado que dificilmente se tem problemas de otimização de política de manutenção ou testes periódicos para componentes operacionalmente isolados, ou seja, o que se tem na prática são sistemas complexos compostos por vários componentes estrutural e fisicamente interdependentes, o estabelecimento de uma política global de intervenções, no nível de sistemas ou até mesmo no de instalações, é um problema complexo de otimização não linear, combinatório, com alto número de graus de liberdade, multi-modal e que admite incontáveis soluções tecnicamente viáveis”.

Devido ao exposto conclui-se que problemas de otimização, em sistemas submetidos a políticas de manutenção ou testes periódicos são complexos e precisam de ferramentas à altura para resolvê-los, dentro desta expectativa e segundo o descrito por KUMAMOTO e HENLEY (1996) e LEWIS (1996), conclui-se que o comportamento da confiabilidade ou da indisponibilidade média de um sistema composto por múltiplos componentes é função dos tempos nos quais estes fizeram manutenção preventiva ou testes periódicos e constitui-se em

um hiper-espaço de topologia complicada cujo ponto de mínimo requer uma técnica de otimização poderosa para ser determinado.

Com o desenvolvimento da capacidade de processamento dos computadores e com o aparecimento de novas e mais poderosas técnicas de otimização, a partir de meados dos anos 90, segundo DUTHIE *et al* (1998), pesquisadores e engenheiros fizeram algumas aplicações de técnicas tradicionais oriundas da análise probabilística de segurança, até então modestamente aplicadas na indústria petroquímica e aeroespacial, para tratar o problema da otimização da política de manutenção preventiva considerando as peculiaridades de outras instalações industriais. Estes trabalhos, contudo, detinham-se simplesmente na obtenção da disponibilidade do sistema com modelos dependentes do tempo (HILSMEIER e ALDEMIR, 1995; VAURIO, 1997), ou descreviam apenas uma comparação entre os modelos empregados e testes entre algumas políticas padrão (MARTORREL *et al*, 1996 e DUTHIE *et al*, 1998), ou, finalmente, como VAN NOORTWIJK *et al* (1992) aplicavam o conhecimento especialista para a determinação de políticas de manutenção. Outros, ainda, para fugir das dificuldades de otimização em um grande espaço de busca abordavam problemas de intervenção para manutenções ou testes em sistemas com poucos componentes (HARUZZAMAN e ALDEMIR, 1996; BILLINTON e PAN, 1998). RAJE *et al* (2000) seguiram a mesma linha abordando problemas envolvendo sistemas em *standby*, sujeitos a testes periódicos. PARK *et al* (2000) contribuíram para a solução desta classe de problemas incluindo componentes com baixíssimo grau de degradação.

CHIANG e YANG (2001), trataram problemas de otimização de manutenção obtendo a disponibilidade dos sistemas por métodos markovianos. Finalmente, DIJKHUIZEN e HEIJDEN (1999) optaram por otimizar a distribuição de intervalos de disponibilidade em substituição à otimização da política de manutenção preventiva. Todos estes autores, contudo, em decorrência da opção por casos exemplos envolvendo sistemas muito pequenos ou

métodos probabilísticos menos complexos não tiveram maiores dificuldades do ponto de vista da otimização. Na verdade, entretanto, os sistemas nucleares, especialmente aqueles ligados à segurança, são repletos de redundâncias e possuem uma grande quantidade de componentes com várias alternativas de combinação e alinhamento entre eles. Como já comentado, o estabelecimento de uma política de manutenção considerando um sistema com estas características é um problema extremamente complexo. Neste momento, estava clara a necessidade da utilização de técnicas de otimização mais poderosas e adequadas para se chegar a uma combinação ótima entre todos os parâmetros do problema. No final dos anos noventa foi publicado o primeiro trabalho que propunha a utilização dos algoritmos genéticos (AG) como ferramenta de otimização em problemas de agendamento de manutenções (MUÑOZ *et al*, 1997). Algum tempo depois, foram publicados trabalhos com avanços na modelagem probabilística (LAPA *et al* 1999 e LAPA *et al*, 2000a) e genética (LAPA *et al*, 2000b e PEREIRA e LAPA, 2000a) no tratamento de problemas de otimização de políticas de manutenção. Estes trabalhos propunham que o objetivo das buscas para a otimização não seriam mais a obtenção das frequências ótimas de reparos, mas permitiam agora, que a ferramenta de otimização procurasse quantas e em que instantes livres no tempo dever-se-iam realizar manutenções preventivas. Não obstante as vantagens desta nova modelagem probabilística, o pouco tempo para conhecimento e divulgação deste modelo pode ter feito com que alguns autores realizassem publicações posteriores, oriundas de trabalhos simultâneos, ainda com a tradicional abordagem de frequência constante de intervenções (LEVITIN e LISNIANSKI, 1999 e MARTORREL *et al*, 2000).

Destacam-se, ainda, o trabalho de LEVITIN e LISNIANSKI (2000) que consideram em seu modelo probabilístico a possibilidade de manutenção imperfeita, o de LAPA *et al* (2001a) que adequou um modelo de custos à possibilidade de agendamentos não periódicos para manutenções e o de MARSEGUERRA e ZIO (2000) que incorpora a simulação de

Monte Carlo juntamente com algoritmos genéticos para otimização de política de manutenção e reparos e, finalmente, YANG *et al* (2000) que propuseram, pela primeira vez numa otimização de política de teste periódicos, uma análise no nível da instalação. A otimização de políticas de testes periódicos, também está sendo investigada por LAPA *et alii* (2001c e 2001d) com algumas diferenças em relação a outros modelos e que podem gerar sugestões com relação às práticas padrão de intervenções. LAPA *et al* (2002), ainda têm investigado problemas de otimização de agendamentos de testes periódicos considerando sazonalidades e restrições ao espaço de busca.

Do ponto de vista global da engenharia nuclear, os algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975) vêm sendo aplicados com grande sucesso, também nas tradicionais áreas de termohidráulica (LAPA *et al*, 2001b), recarga de combustível (SCHIRRU *et al*, 1997 e CHAPOT *et al*, 1999), projeto neutrônico (PEREIRA *et al*, 1999) e identificação de transientes (ALVARENGA *et al*, 1997, PEREIRA *et al*, 1998 e SCHIRRU, 2000b), e segundo LAPA (2001b) o que demonstra que estes algoritmos têm sido bastante úteis na resolução de novos problemas que estavam em aberto e no tratamento de antigos problemas que ainda não haviam encontrado soluções aceitáveis.

A base de resultados consagrados dos experimentos computacionais em problemas de otimização de políticas de testes periódicos em sistemas nucleares com uso de algoritmos genéticos, conforme ilustrado anteriormente, incentivou a continuidade das investigações de ferramentas de inteligência artificial para otimização, esta iniciativa resultou na identificação do algoritmo de otimização por enxame de partículas, do inglês “*Particle Swarm Optimization*” (PSO) como ferramenta alternativa ao AG.

Atualmente alguns experimentos foram realizados com o PSO, (SIQUEIRA, et al, 2005) comparando-se os resultados com aqueles obtidos pelo AG em um problema de otimização de agenda de testes periódicos. Nestes experimentos iniciais, onde um problema

hipotético foi abordado, o PSO superou o AG. Motivados por tais resultados, procurou-se resolver um problema mais realístico.

1.2 Objetivos

Objetiva-se, nesta tese, a investigação da utilização do PSO, associado a um modelo de análise probabilística de segurança, para identificação de políticas de testes/manutenção periódicas que maximizam a disponibilidade média de sistemas inerentes a ambientes industriais.

A metodologia proposta é, comparada com outra utilizando AG, em problemas idênticos.

1.3 Contribuições

Identificação de nova ferramenta para resolução de problemas de otimização de testes/manutenção periódicos de aplicação nuclear, com a adição dos atributos listados abaixo:

- i)* Facilidade de implementação;
- ii)* Resolução de problemas em espaços de busca contínuos intrínsecos à natureza da ferramenta;
- iii)* Resultados compatíveis (às vezes um pouco melhores) com o AG, porém com menor esforço computacional.

CAPÍTULO 2 – Modelo Probabilístico

Este capítulo apresenta as definições clássicas de confiabilidade e disponibilidade, identifica os tipos de variáveis utilizados na tese, explica a relação entre as definições, descreve as configurações série e paralelo e finalmente, desenvolve as ferramentas probabilísticas necessárias ao estudo desta tese, integrando o cálculo de indisponibilidade ao modelo de LAPA (2001b).

2.1 Definição de confiabilidade

Através de um cenário típico de uma indústria, com um sistema submetido a políticas operacionais regulares, ou seja, com demandas bem definidas e períodos entre manutenções e testes bem caracterizados, pode-se definir dois estados operacionais, o de sucesso e outro de falha, o primeiro deles representado por r e o outro por dedução probabilística conforme segue abaixo:

$$p = (1 - r) \quad (2.1-1)$$

Conforme definido por LEWIS (1996) demanda é um termo muito genérico, podendo ser representado pelo chaveamento de um relé elétrico, abertura de uma válvula, partida de um motor, entre outros eventos, porém não importando as aplicações, existem dois pontos relevantes. Primeiro, as demandas devem ser quantizadas, ou seja, deve ser possível contabilizar o número de ocorrências dela. Em segundo lugar, a probabilidade de sucesso a cada demanda deve ser independente do número das demandas anteriores.

Define-se confiabilidade R_n como a probabilidade que um dado sistema estará operacional após n demandas. Então se as probabilidades de sucesso a cada demanda são mutuamente independentes, R_n é dado por:

$$R_n = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot P(X_3) \dots P(X_n) \quad (2.1-2)$$

Sendo, $P(X_n) = r$ para todo n , então: $R_n = r^n$ (2.1-3)

Usando a equação 2.1-1 tem-se:

$$R_n = (1 - p)^n \quad (2.1-4)$$

Contudo, esta fórmula possui um modelo mais usual e é dado pela aproximação exponencial:

$$\ln(R_n) = \ln(1 - p)^n = n \cdot \ln(1 - p) \quad (2.1-5)$$

O que significa: $R_n = \exp(n \cdot \ln(1 - p))$ (2.1-6)

Supondo que a probabilidade de o componente falhar sob demanda é muito pequena, pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$\ln(1 - p) \simeq -p \quad (2.1-7)$$

para $p \ll 1$, tem-se: $R_n \simeq e^{-np}$ (2.1-8)

Sabendo que $p \ll 1$ é uma boa aproximação, é visto que a confiabilidade decai exponencialmente com o número de demandas. Supondo que a duração de cada demanda é aproximadamente constante, então:

$$t \approx n \cdot \Delta_t \quad (2.1-9)$$

Onde Δ_t é o tempo médio de intervalo entre demandas e t é o tempo total da missão considerada. Com estas definições pode-se enunciar a confiabilidade $R(t)$, definida como a probabilidade de um sistema operar até um instante t , como:

$$R(t) \simeq e^{-\lambda t} \quad (2.1-10)$$

λ é chamado de taxa de falha e é dado pela fórmula abaixo:

$$\lambda = \frac{P}{\Delta t} \quad (2.1-11)$$

Os parágrafos anteriores descrevem confiabilidade em termos de variáveis discretas aleatórias, esta abordagem serve para estimar a quantidade de eventos similares em uma mesma missão, no entanto os parágrafos à frente consideram a dependência da probabilidade de falha com outra variedade de incógnitas que são contínuas, como por exemplo, o tempo de uma missão e a força de um sistema. Isto significa que mesmo se vários testes e medições das variáveis fossem realizadas em um sistema, os valores obtidos seriam diferentes em cada teste, por isso esses valores são chamados de variáveis aleatórias contínuas. Este novo conceito de variável possibilita a abordagem de confiabilidade em termos de probabilidades usando intervalos de valores, naturalmente sem exatidão de resultados, mas com bastante aplicações nesta tese. Então confiabilidade pode ser definida em termos de variável aleatória contínua T_1 , onde esta representa o instante de tempo para ocorrência da falha em um sistema, portanto, conforme LEWIS (1996), a função densidade de probabilidade, conhecida como PDF $f(t)$, apresentará a seguinte definição física.

Probabilidade de uma falha acontecer em um tempo entre t e $(t + \Delta t)$:

$$f(t) \Delta t = P\{t \leq T_1 \leq t + \Delta t\} \quad (2.1-12)$$

Usando as propriedades de função cumulativa de distribuição (CDF), encontra-se a probabilidade de uma falha ocorrer em um instante menor ou igual a t :

$$F(t) = P\{T_1 \leq t\} \quad (2.1-13)$$

Probabilidade de um sistema operar sem falha até um instante de tempo menor do que t :

$$R(t) = P\{T_1 > t\} \quad (2.1-14)$$

Supondo que um sistema não falhe dentro do intervalo $T_1 \leq t$, portanto falhará somente no intervalo ($T_1 > t$), tem-se:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.1-15)$$

O equivalente seria:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t') dt' \quad \text{ou} \quad R(t) = \int_t^{\infty} f(t') dt' \quad (2.1-16)$$

Das propriedades do PDF, fica claro que:

$$R(0) = 1$$

$$R(\infty) = 0$$

Conforme LEWIS (1996) confiabilidade é uma CCDF (Complementary Cumulative Density Function) de t , expressa pela igualdade $R(t) = \tilde{F}(t)$. Analogamente, define-se não-confiabilidade, sendo $F(t)$ a probabilidade de um sistema falhar antes de $T_1 = t$, matematicamente descrita por:

$$\tilde{R}(t) \equiv 1 - R(t) \equiv F(t) \quad (2.1-17)$$

Utilizando a inversão da equação (2.1-16) por diferenciação, pode-se obter a PDF do tempo de falha em termos de confiabilidade.

$$f(x) = -\frac{d}{d(t)} R(t) \quad (2.1-18)$$

Esta taxa de falha, $\lambda(t)$, que pode ser definida em termos de confiabilidade ou PDF do tempo de falha como segue. Seja $\lambda(t)\Delta(t)$, a probabilidade do sistema falhar no período de $T_1 < t + \Delta(t)$, supondo que a falha ainda não ocorreu em $T_1 = t$, então este é um caso de probabilidade condicional.

$$\lambda(t)\Delta(t) = P\{T_1 < t + \Delta(t) / T_1 > t\} \quad (2.1-19)$$

Usando a definição de probabilidade condicional tem-se:

$$P\{T_1 < t + \Delta(t) / T_1 > t\} = \frac{P\{(T_1 > t) \cap (T_1 < t + \Delta(t))\}}{P\{T_1 > t\}} \quad (2.1-20)$$

O numerador do segundo membro da equação é somente um caminho alternativo para escrever o PDF, como segue:

$$P\{(T_1 > t) \cap (T_1 < t + \Delta(t))\} \equiv P\{t < T_1 < t + \Delta(t)\} = f(t) \Delta(t) \quad (2.1-21)$$

O denominador da equação (2.1-20) é somente $R(t)$, como pode ser examinado pela equação (2.1-14), conseqüentemente, combinando as duas equações encontra-se, a taxa de falha que também é conhecida como “função perigo” ou taxa instantânea de falha.

$$\lambda(t) = -\frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.1-22)$$

O caminho mais usual para expressar a confiabilidade está em termos de taxa de falha. Para realizar isto, em primeiro lugar deve-se eliminar $f(t)$ da equação (2.1-22) inserindo a equação (2.1-18) para obter a taxa de falha em termos de confiabilidade.

$$\lambda(t) = \frac{-1}{R(t)} \frac{d}{dt} R(t) \quad (2.1-23)$$

Depois multiplicando os dois membros por dt .

$$\lambda(t) dt = \frac{-dR(t)}{R(t)} \quad (2.1-24)$$

Integrando a equação no intervalo de 0 até t .

$$\int_0^t \lambda(t') dt' = -\ln [R(t)] \quad (2.1-25)$$

Usando as propriedades das funções exponenciais:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t') dt'\right] \quad (2.1-26)$$

Para obter a função densidade de probabilidade (PDF), basta inserir a equação (2.1-26) na equação (2.1-24) e resolver para $f(t)$.

$$f(t) = \lambda(t) \exp\left[-\int_0^t \lambda(t') dt'\right] \quad (2.1-27)$$

2.2 Definição de Disponibilidade

De acordo com LEWIS (1996), para sistemas “reparáveis” existe uma variável de muito interesse conhecida como disponibilidade, e é definida como:

$A(t)$ = Disponibilidade é a probabilidade de um sistema ser encontrado em estado operacional num exato instante t .

Esta grandeza é formalmente definida como disponibilidade pontual. Frequentemente necessita-se conhecer a grandeza referente a sua média temporal.

$$A^*(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.2-1)$$

Este é o valor médio da disponibilidade sobre o intervalo de tempo T . Este intervalo pode ser o ciclo de vida do sistema ou o tempo para realizar uma determinada missão. Isto é frequentemente encontrado depois dos efeitos iniciais da operação ou de um transiente, onde a disponibilidade do ponto médio assume um valor independente do tempo, portanto para se determinar a disponibilidade de um sistema em regime permanente, tem-se:

$$A^*(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (2.2-2)$$

Se um sistema ou seus componentes não sofrem reparos ou testes, a disponibilidade pontual é exatamente igual à confiabilidade. A probabilidade de um sistema

estar disponível no instante t é exatamente igual a probabilidade de não falhar o sistema no intervalo de tempo compreendido de 0 até t . Aproximando estas afirmações pode-se escrever:

$$A(t) = R(t) \quad (2.2-3)$$

Combinando as equações (2.2-2) e (2.2-3), tem-se:

$$A^*(T) = \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt \quad (2.2-4)$$

2.3 Modelo probabilístico de testes periódicos em cálculos de disponibilidade

A capacidade de crescimento tecnológico e o alto nível de exigência humana motivam as inovações presentes na sociedade e certamente estão construindo grande parte do futuro da ciência, contudo questões relacionadas a qualidade de produtos e serviços, assim como, aquelas ligadas as práticas de segurança e prevenção de acidentes, são hoje, as áreas que concentram a responsabilidade de assegurar o desenvolvimento sustentável da humanidade sem comprometer a integridade do ambiente e dos seres.

Esta visão sistêmica abriu espaço para pesquisas industriais interligadas a produção de energia, e dentro do interesse da tese, são destacados os sistemas de geração de energia nuclear, os quais apresentam muitos componentes em modo de redundância fria (elemento que serve como contingência de outro, porém está desligado à espera de uma demanda). Estes sistemas possuem as premissas de alta disponibilidade que estão intimamente relacionadas às taxas de falhas dos componentes, portanto, são necessários arranjos de equipamentos capazes de garantir as funções pelos quais eles foram projetados, mesmo sob situações limites. Porém o objeto de estudo desta tese, envolve um passo além deste, isto significa, que dado um arranjo de componentes em um sistema com alta disponibilidade, dever-se-á aplicar uma política de testes/manutenção, garantindo que os

componentes em modo de espera estejam prontos para operar, em qualquer instante dentro do período da missão.

Neste modo de espera, caso algum componente esteja falho esta situação não será revelada até que haja uma demanda real. Para tratar este problema, a estratégia recomendada (GROSH, 1989 e LEWIS, 1996) é a adoção de uma política de testes periódicos que seja capaz de revelar a falha antes do componente ser solicitado. Esta política deve ser tal que, além de indicar o momento da execução de um reparo antes que uma demanda real ocorra não seja tão exaustiva, que por sua alta frequência comprometa a disponibilidade média total do componente. O modelo de testes periódicos proposto por LAPA *et alii* (2001c, 2001d) baseia-se, fundamentalmente, nos seguintes conceitos:

1 - Um componente em modo de espera fria sofre pouco os efeitos do envelhecimento, tendo uma taxa de falha em *standby* praticamente constante (LEWIS, 1996) e, caso seja submetido a testes exaustivos, sofrerá mais intensamente os efeitos do envelhecimento em decorrência destes períodos de operação quase sempre muito severos quanto às exigências de desempenho;

2 - Após a execução de um teste, se fossem considerados somente os impactos inerentes à taxa de falha em modo de espera fria, o componente voltaria à linha com disponibilidade um (*as-good-as-new*). Contudo, dado que o teste por si só provoca um envelhecimento no componente, isto não ocorre. Portanto, quando um componente é demandado para uma teste periódico, sofre um processo de desgaste e por consequência de envelhecimento, e ainda, mesmo quando não se detectam falhas ou quando o reparo é necessário (um eventual reparo é sempre seguido de outro teste operacional) o componente não retorna ao modo de espera

completamente novo com disponibilidade um, mas com os efeitos do desgaste decorrente do tempo em que operar durante os testes;

3 – Existe uma probabilidade do componente revelar-se falho durante um teste, assim, se isto ocorrer, este ficaria indisponível não somente pelo tempo necessário para o teste mas pelo tempo necessário para o teste acrescido do tempo necessário para o devido reparo;

4 – Os testes não são da mesma natureza ou tipo, portanto não necessariamente devem durar o mesmo tempo;

5 – Quando um determinado componente é selecionado para um teste, todos os componentes estrutural ou operacionalmente relacionados (conectados) a ele ficam indisponíveis;

6 – Admite-se que um teste seja realizado em qualquer tempo, ou seja, os testes para inspeção não são realizados com uma frequência constante, portanto não são necessariamente periódicos como de costume.

Seguindo o modelo de LAPA, a disponibilidade de um componente sujeito a testes ocorridos nos tempos T_i e de duração Δ_i está definida de acordo com as seguintes equações:

$$A_i(t, T_i, k) = A[t - (k \cdot T_i)] \quad (2.3-1)$$

$$0, \text{ se } kT_i \leq t \leq kT_i + \Delta_i \quad k = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$\text{para } T_r(k) \leq t < T_r(k+1)$$

Partindo do pressuposto que se pode agendar um teste periódico para qualquer instante $T_i(k)$ dentro da missão do sistema, e adicionando a parcela de $\Delta_r(k)$, que significa a probabilidade de realizar um reparo, caso o componente se revele falho durante a execução dos testes periódicos, e portanto $\Delta_i(k)$ tornam-se funções de k , pois no instante k está a

probabilidade de um reparo acontecer, e com isso Δ_t poder assumir valores completamente diferentes, de acordo com cada tipo de falha apresentada no instante k . Abaixo está a equação com todas estas considerações:

$$A_t[t, T_i(k)] = A[t - T_i(k)]$$

$$0, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{\Delta_t(k) + [1 - A_t(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k)\}$$
(2.3-2)

para , $k = 1, 2, 3, \dots, N$

para , $T_r(k) \leq t < T_r(k+1)$

ou então:

$$A_t[t, T_i(k)] = A[t - T_i(k)]$$

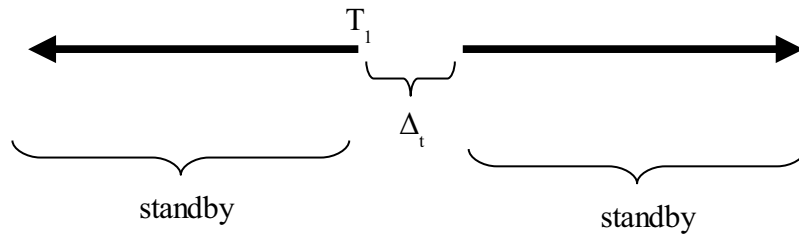
$$0, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{\Delta_t(k) + [\bar{A}_t(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k)\}$$
(2.3-3)

para , $k = 1, 2, 3, \dots, N$

para , $T_r(k) \leq t < T_r(k+1)$

$A_t(t - T_i(k) - 1)$ é a probabilidade do componente ter falhado, em modo de espera, até o instante imediatamente anterior ao k -ésimo teste agendado para o tempo $T_i(k)$, assim o produto entre $A_t(t - T_i(k) - 1)$ e $\Delta_r(k)$ o que resulta em $[A_t(t - T_i(k) - 1)] \Delta_r(k)$, representa a fração média de tempo que um componente ficaria indisponível por falha revelada a cada teste. Esta grandeza quando acrescida do tempo do teste $\Delta_t(k)$, representa o tempo, em média, que o componente fica desalinhado durante um teste. Integrando $[A_t(t - T_i(k) - 1)] \Delta_r(k)$, no tempo da missão, obtém-se a contribuição do tempo total de desalinhamento em função de falhas reveladas pelos testes.

Contudo, durante um teste, o sistema sofre um desgaste operacional que resulta a diminuição de sua disponibilidade futura. A modelagem deste fenômeno pode ser feita da seguinte forma. Seja um componente em *standby* que sofre um teste no instante T_i e duração Δ_t .



Seja S um evento de resultado satisfatório à resposta de um componente a uma demanda no tempo t , e que pode ser definido da seguinte maneira:

$$S = E_1 \cap E_2 \quad (2.3-4)$$

Onde E_1 significa a probabilidade do componente não ter falhado enquanto permanecia em *standby* até um teste para inspeção no tempo T_1 , assim como, E_2 é a probabilidade do componente não falhar durante a operação do teste iniciado no momento T_1 e com duração Δ .

Aplicando os conceitos de probabilidade e considerando que os eventos E_1 e E_2 são independentes entre si, tem-se: $A(t, T_1) = A(t, T_1) \cdot R(\Delta_t)$ (2.3-5)

Partindo da premissa que os testes duram tempos iguais, após k testes temos:

$$A(t, T_i(k)) = A(t, T_i(k)) \cdot R(k \cdot \Delta_t) \quad (2.3-6)$$

Introduzindo este conceito na equação 2.3-3:

$$A_i[t, T_i(k)] = A[t - T(k)] \cdot R(k \cdot \Delta_t) \quad (2.3-6)$$

$$0, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{ \Delta_t(k) + [\bar{A}_i(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k) \}$$

para, $k = 1, 2, 3, \dots, N$

para, $T_r(k) \leq t < T_r(k+1)$

Onde $A(t, T_i)$ é a disponibilidade do componente sujeito a um teste no tempo T_i , e $R(\Delta_i)$ é a confiabilidade do componente após ter operado pelo tempo Δ_i , conforme definido na seção 2.1. No entanto a modelagem desta tese está baseada na formulação de indisponibilidade, como segue:

$$\bar{A}[t, T_i(k)] = 1 - [A(t - T(k)) \cdot R(k, \Delta_i)]$$

$$1, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{\Delta_i(k) + [\bar{A}_i(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k)\}$$
(2.3-7)

para, $k = 1, 2, 3, \dots, N$

Ou então:

$$\bar{A}[t, T_i(k)] = 1 - [A(t - T(k)) \cdot [1 - \bar{R}(k, \Delta_i)]]$$

$$1, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{\Delta_i(k) + [\bar{A}_i(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k)\}$$
(2.3-8)

para, $k = 1, 2, 3, \dots, N$

para, $T_r(k) \leq t < T_r(k+1)$

Aplicando a propriedade distributiva, tem-se:

$$\bar{A}[t] = 1 - [A(t - T(k)) - A(t - T(k)) \bar{R}(k, \Delta_i)]$$

$$1, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{\Delta_i(k) + [\bar{A}_i(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k)\}$$
(2.3-9)

para, $k = 1, 2, 3, \dots, N$

para, $T_r(k) \leq t < T_r(k+1)$

$$\bar{A}[t] = 1 - A(t - T(k)) + \bar{R}(k, \Delta_i) A(t - T(k))$$

$$1, \text{ se } T_i(k) \leq t \leq T_i(k) + \{\Delta_i(k) + [\bar{A}_i(t - T_i(k)) - 1] \Delta_r(k)\}$$
(2.3-9)

para, $k = 1, 2, 3, \dots, N$

O efeito de envelhecimento do componente é aumentado a cada intervenção (testes periódicos), e se não fossem por elas, a indisponibilidade do componente em modo de espera fria retornaria a zero a cada intervenção nos tempos $T_i(k)$, no entanto o valor $\bar{R}(k, \Delta_i) A(t - T_i(k))$ acrescido a indisponibilidade total formando assim uma curva dente de serra/escada. O gráfico a seguir 2.3-1 mostra este comportamento.

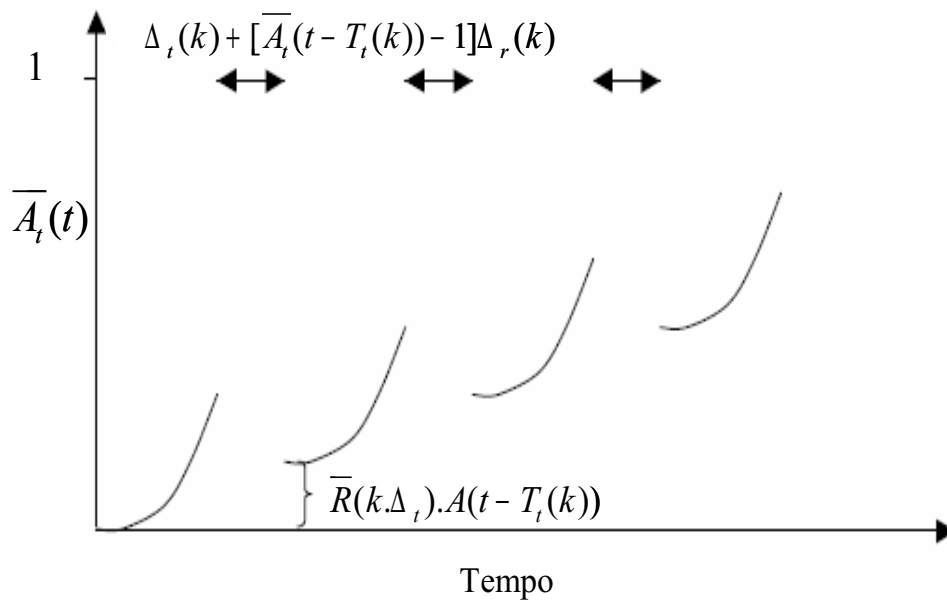


Figura 2.3-1 Curva dente de indisponibilidade total em forma dente de serra/escada

CAPÍTULO 3 – O Problema de otimização

Este capítulo apresenta o algoritmo PSO, bem como a formulação do problema de otimização a ser resolvido.

3.1 Otimização Por Enxame de Partículas (PSO)

PSO é uma técnica de computação evolucionária inspirada nos mecanismos de adaptação de indivíduos em sociedade que considera a prospecção individual combinada à idéia de cooperação entre indivíduos da população. Foi concebida através da simulação de modelos sociais simplificados, ao exemplo de revoada de pássaros, cardume de peixes e a teoria de enxame (KENNEDY J, EBERHART RC, 1995). A estrutura teórica do PSO é muito simples, possui codificação e implementação computacional fáceis (KENNEDY J, EBERHART RC, 1995), apresenta baixo custo em termos de requisição de memória e processamento. Devido a estas características, o PSO tem ganhado muita atenção para diversas aplicações em diferentes campos de pesquisa.

Com a observação destes modelos sociais simplificados foi possível identificar a metáfora geradora do algoritmo: A idéia chave do enxame, rebanho, ou do cardume de peixes, é que, na busca de alimento, todo o agente do grupo pode lucrar com as descobertas e/ou com as experiências dos membros do enxame. Esta vantagem pode se tornar decisiva, sempre que as fontes de alimentos estão distribuídas em caminhos imprevisíveis. Isto significa que existe uma vantagem evolucionária quando a informação é socialmente distribuída pelos agentes, seja do cardume de peixes ou na revoada de pássaros.

De acordo com KENNEDY (1998), uma simples teoria socio-cognitiva oriunda do estudo “Modelo Cultural Adaptativo” baliza o enxame de partículas (PSO). Enunciou-se em dois componentes o processo da adaptação cultural, um de alto nível (parcela cognitiva), sendo a formação dos padrões através dos indivíduos e a habilidade de resolver problemas; e outro de baixo nível (parcela social), ilustrado através dos comportamentos reais e provavelmente universais dos indivíduos. Abaixo estão os três princípios básicos relativos a componente social: avaliação, comparação e imitação.

Avaliação

O estímulo à tendência de avaliar em positivos e negativos, atrativos ou repulsivos é a maior característica e a mais encontrada nos organismos vivos. Mesmo uma bactéria é capaz de ficar agitada, movendo-se de um lado a outro quando o ambiente ao qual ela está submetida apresenta-se nocivo à sua estrutura. O aprendizado não pode acontecer, a menos que o organismo possa avaliar, ou seja, distinguir características no ambiente que sejam atrativas ou repulsivas, entendendo a escala de “bom até ruim”. A partir deste ponto de vista, o aprendizado pode ser definido como a mudança que possibilita o organismo a incrementar sua capacidade de avaliar o seu próprio ambiente.

Comparação

A teoria de comparação social por FESTINGER (1954) apresenta alguns padrões de medida que as pessoas utilizam com as outras para se compararem, e também explica como a comparação aos outros pode servir como um tipo de motivação para o aprendizado e mudanças. Porém, esta mesma teoria na sua forma original, não está sedimentada de maneira simples a ser testificada ou reformulada, além disso, algumas poucas previsões oriundas da

teoria ainda não foram confirmadas, no entanto, ela serve como “espinha dorsal” para outras teorias sociais subseqüentes.

A população em sua maioria pensa e age, julgam uns aos outros através de comparações, avaliam-se quanto à aparência, saúde, humor, inteligência, e outros aspectos como opinião e habilidades. Dentro deste conceito, foram delineados os indivíduos, tanto no modelo de cultura adaptativa, como no enxame de partículas, ou seja, indivíduos que se comparam entre si, usando suas medidas e críticas, e por fim imitando somente os vizinhos considerados superiores a eles próprios. Os padrões para comportamentos sociais são feitos por comparação com outros, e esta idéia está inserida nos modelos de otimização por enxame de partículas.

Imitação

A imitação está presente em toda natureza, esta é forma efetiva com que se aprende a realizar ou produzir algo. Como LORENZ (1973) destacou, apenas algumas classes de animais são capazes de realmente imitar. De fato, ele citou apenas os pássaros e humanos como os capazes de fazer isso. Existem algumas variações de aprendizado que podem ser encontradas na natureza, mas nenhuma se compara à capacidade humana de imitar o outro, ao exemplo dos macacos que repetem as ações que eles podem ver, mas os humanos imitam as perspectivas de outros indivíduos, copiam seus propósitos, e executam os mesmos comportamentos em momentos apropriados à auto-superação ou sobrevivência.

Usando a combinação dos princípios acima, foi possível, mesmo com uso de sociedades simplificadas, criar programas computacionais, capazes de se adaptar a desafios complexos, resolvendo problemas extremamente complicados.

A otimização baseia-se na metáfora de procura de alimentos por agentes de um enxame, onde o local repleto de alimento é a melhor solução global a ser considerada no

espaço de busca do problema real. Para tal, as partículas se movimentam (se adaptam) considerando basicamente duas informações (componentes): a primeira é o melhor local por onde já passou durante toda sua história (sua melhor posição, representando a componente cognitiva); e a segunda é a posição da melhor partícula (componente social) eleita a cada passo de geração, ou seja, a trajetória de cada indivíduo no espaço de busca é ajustada dinamicamente, alternando a velocidade de cada partícula de acordo com a própria experiência de busca, e a experiência de busca de outras partículas no espaço.

Seja $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d}]$ e $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d}]$, a posição e a velocidade da i -ésima partícula, em um espaço de busca d -dimensional, respectivamente. Cada partícula possui informação da sua melhor posição (p_{best}) $P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,d})$ corresponde ao melhor valor objetivo particular alcançado dentro do tempo t . A partícula denotada como melhor global (g_{best}) é representada como P_g , ao qual representa a melhor partícula encontrada dentro do enxame até o tempo t , e eleita a cada passo de geração. O cálculo da velocidade de cada partícula, bem como a atualização de sua posição, podem ser feitos como se segue:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(p_{i,j} - x_{ij}(t)) + c_2r_2(p_{g,j} - x_{ij}(t)), \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (3-1.1)$$

$$X_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (3-1.2)$$

A figura (3.1-1) ilustra a atualização de uma partícula, onde c_1 e c_2 são constantes conhecidas como coeficientes de aceleração, w é o fator de inércia, r_1 e r_2 são dois números aleatórios independentes uniformemente distribuídos no intervalo de $[0,1]$.

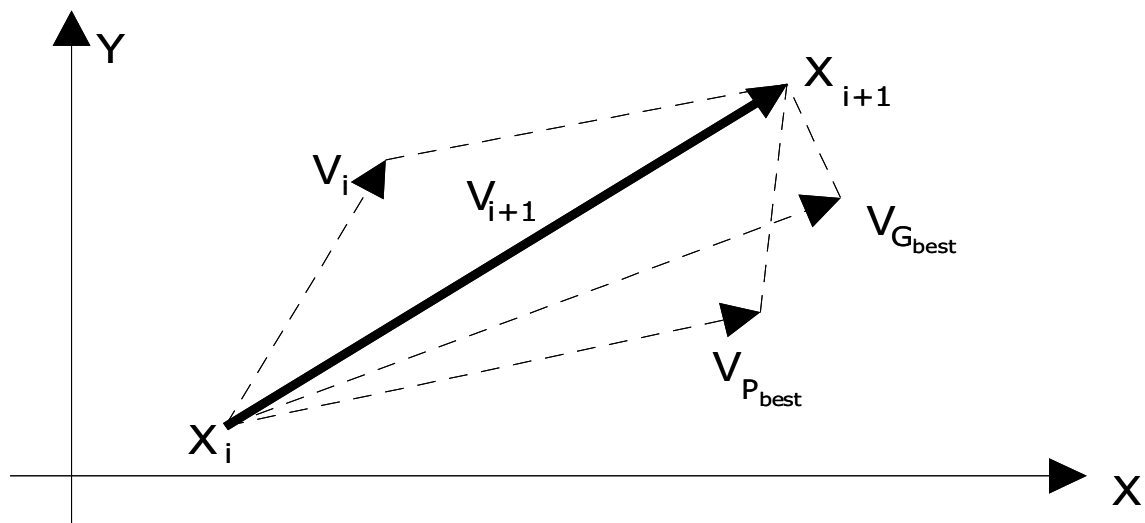


Figura 3.1-1 : Atualização de velocidade no PSO.

Na equação (3-1.1), o parâmetro “ w ” conhecido como fator de inércia, enunciado por SHI e EBERHART (1998) como o controle de impacto entre o histórico de velocidades na velocidade atual, ou seja, o parâmetro de inércia é responsável pela convergência do PSO e através dele que se controla a exploração global e local da solução, portanto um alto valor de inércia facilita a exploração de novas áreas, enquanto um valor pequeno refina a busca da solução encontrada. Um valor apropriado de inércia é capaz de garantir um balanço na busca por novas áreas e o refinamento da solução, isto pode ser conseguido pela fórmula a seguir SIQUEIRA (2005):

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (3-1.3)$$

Onde w_{\max} e w_{\min} são as constantes de máximo e de mínimo para o valor de inércia e $iter$ é o número de iteração.

Outra prática adotada é usar a definição de velocidade máxima para cada módulo do vetor velocidade, o que auxilia na criação de um limite superior para o módulo de cada vetor posição. Justifica-se esta implementação com o controle das desnecessárias buscas de solução fora do espaço de busca pré-definido.

Propõe-se nesta tese a utilização do PSO para resolução de um problema de otimização, e conhecendo a sua formulação, e seus conceitos é importante ressaltar como o algoritmo opera. A figura (3.1-2) é um pseudo-código do PSO e serve para análise dos problemas desta tese.

A figura (3.1-2) representa o PSO clássico para um problema de maximização, onde toda as partículas navegam em um espaço n-dimensional, correspondentes aos n parâmetros a serem otimizados e delimitados por seus intervalos. A topologia do enxame é definida como uma vizinhança global, também conhecida como topologia gBest, onde todas as partículas são informadas sobre outro novo “ponto ótimo”, encontrado por uma das partículas dentro do espaço de busca.

```

início
    { Início }
    Para
        i = 1 até n_particles faça
            randomize ( Xi )
            randomize ( Vi )
        fim

    { Atualizando laço }
    para iter = 1 até itermax faça

        { Avalie e atualize bests }
        para i = 1 até n_particles faça
            fitnessi = avalia ( Xi )
            se ( fitnessi > pBesti ) pBesti = fitnessi
            se ( fitnessi > gBest ) gBest = fitnessi
        fim

        { Mover partículas }
        para = i até n_particles faça

            { Atualize w }
            w = wmax - iter * ( wmax - wmin ) / itermax

            { Atualize velocidade }
            Vi = w * Vi + c1 * r1 * ( pBesti - Xi ) + c2 * r2 * ( gBest - Xi )

            { Atualize posição }
            Xi = Xi + Vi
        fim
    fim
fim

```

Figura (3.1-2) : Pseudo-código PSO

Conforme o Pseudo-código (3-1.2), o enxame é iniciado aleatoriamente (posições e velocidades). Depois, enquanto o critério de parada não for atingido (neste caso o máximo número de iterações), o laço do algoritmo executará os passos a seguir:

- i)* Partículas serão avaliadas de acordo com a função objetivo, e os valores da fitness serão atribuídos a cada partícula.
- ii)* Os valores pBest e gBest são atualizados
- iii)* As partículas se deslocarão de acordo com as equações de velocidade (3-1.1) e posição (3-1.1).

Dado que os problemas a serem estudados nesta tese versam sobre o assunto disponibilidade média, é notório que as funções objetivo serão otimizadas dentro do modelo probabilístico descrito no capítulo anterior, além disso, o PSO possui em sua estrutura o valor posição X_i , e através dele que o valor da disponibilidade média será otimizado.

3.2 Função Objetivo

Considerando o modelo probabilístico apresentado no capítulo anterior, disponibilidade média para sistemas ou componentes submetidos à testes periódicos em modo de espera, a expectativa deste trabalho é propor uma agenda de testes periódicos que seja ótima, sob o foco de criar uma frequência de testes nem tão alta que possa comprometer a disponibilidade média do sistema, nem tão baixa que possa ocultar um componente falho.

Para tal, são feitas as considerações abaixo:

- i)* Tempo de missão;
- ii)* Tempo de duração dos testes;

- iii) Tipo de testes;
- iv) Taxa de falha associada ao componente;
- v) Desgaste do componente em virtude do teste;
- vi) Quantos e quais componentes estão interligados ao objeto do teste;
- vii) Quanto à disponibilidade média é alterada com a retirada do componente para teste;

Através de um programa computacional corretamente desenvolvido, estas considerações poderão ser todas quantizadas e devidamente calculadas para obter-se o valor da indisponibilidade média do sistema, dado uma política de agenda. Abaixo está a função objetivo para o referido cálculo. Verificando o pseudo-código da figura (3.1-2), identifica-se a variável *fitness* que está representada pela formulação abaixo.

$$Fit_t = \frac{1}{T_{mis}} \int_{t=0}^{T_{mis}} \bar{A}(t)_{sis} dt \quad (3-2.1)$$

$\bar{A}(t)_{sis}$ é a indisponibilidade do sistema obtida pela Eq. (2-3.10).

Através desta integral têm-se todas as contribuições favoráveis e desfavoráveis, consideradas para o cálculo da indisponibilidade média total, e com isso, todas as partículas do PSO serão orientadas seguindo o fluxo descrito anteriormente até encontrar a solução otimizada do problema.

CAPÍTULO 4 – Aplicação do método

Neste capítulo serão apresentados dois problemas de otimização de agendas de testes periódicos que serão resolvidos utilizando duas ferramentas, algoritmo genético (AG) e PSO.

Neste contexto destacam-se os resultados obtidos pelo PSO quando comparados ao estudo de LAPA (2001b) com o uso de AG.

4.1 Agenda de testes periódicos em sistema eletromecânico hipotético.

O primeiro experimento computacional tem por objetivo comparar duas ferramentas de otimização PSO x AG, propondo agendas ótimas de testes periódicos para um sistema hipotético, levando em consideração a função prêmio indisponibilidade definida na equação (3-2.1).

O sistema eletromecânico hipotético aqui considerado encontra-se em *standby*, e é representado por dois motores, duas bombas e três válvulas, todos interligados e capazes de criar *bypass*, através de dois trens básicos.

É um sistema típico que pode ser encontrado em muitos projetos, desde instalações de proteção contra incêndio até mesmo em um sistema de injeção de segurança, ressalta-se que todas as características operacionais estão sendo resguardadas, com valores de sistemas reais encontrados na literatura, tais como: tempo de um teste, tempo de reparo, taxas de falha em *standby* e taxas de falha em operação LAPA (2001b).

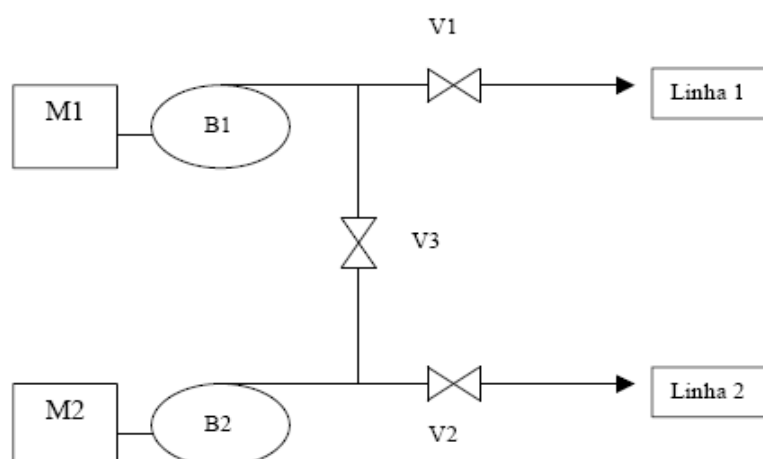


Figura 4.1-1 Sistema Eletromecânico hipotético

O sistema eletromecânico da figura (4.1-1) foi desenvolvido para suportar a carga nominal do sistema principal utilizando apenas um dos dois trens presentes em seu arranjo (lógica de sucesso 1/2), portanto, no momento de uma demanda real um trem estará em carga, enquanto o outro está em modo de espera. Vale ressaltar que esta configuração permanecerá até que haja uma interrupção e o trem que está em modo de espera assumirá a operação do trem que falhou.

Considerando o estudo apresentado no capítulo dois, pretende-se que este sistema esteja pronto para uma demanda em qualquer instante dentro do tempo de missão considerado, mesmo quando parte do sistema encontra-se indisponível para qualquer desalinhamento. Portanto, conhecendo as taxas de falha de cada um destes componentes durante sua vida útil, poder-se-á calcular a probabilidade de falha e a conseqüente indisponibilidade do sistema. O conceito de corte mínimo, definido como o menor arranjo possível capaz de acarretar a falha do sistema, é o real fundamento que sustenta a capacidade do sistema ser testado periodicamente sem impactos operacionais significativos a disponibilidade total.

Para a formulação de corte mínimo foram considerados os passos listados abaixo:

- 1- Considerar que este sistema possui quatro configurações básicas, sendo duas os próprios trens do sistema, e as outras duas considerando a utilização do *bypass*.
- 2- Determinação dos cortes mínimos;
- 3- Calcular a probabilidade de ocorrências para cada um dos cortes mínimos do sistema;
- 4- Calcular a probabilidade de falha total do sistema utilizando o resultado do passo anterior.

Definição dos eventos:

M_1 – Evento de falha do motor 1

M_2 – Evento de falha do motor 2

B_1 – Evento de falha da bomba 1

B_2 – Evento de falha da bomba 2

V_1 – Evento de falha da válvula 1

V_2 – Evento de falha da válvula 2

V_3 – Evento de falha da válvula 3

Cortes mínimos:

2º ordem

$$M_1 = M_1 \cap M_2$$

$$M_2 = M_1 \cap B_2$$

$$M_3 = M_2 \cap B_1$$

$$M_4 = B_1 \cap B_2$$

$$M_5 = V_1 \cap V_2$$

3º ordem

$$M_6 = M_1 \cap V_3 \cap V_2$$

$$M_7 = B_1 \cap V_3 \cap V_2$$

$$M_8 = M_2 \cap V_3 \cap V_1$$

$$M_9 = B_2 \cap V_2 \cap V_1$$

Supondo os eventos independentes entre si, a probabilidade de ocorrência de cada corte mínimo pode ser representada pelas probabilidades de ocorrências de cada evento básico que o compõe::

$$P(M_1) = P(M_1).P(M_2)$$

$$P(M_2) = P(M_1).P(B_2)$$

$$P(M_3) = P(M_2).P(B_1)$$

$$P(M_4) = P(B_1).P(B_2)$$

$$P(M_5) = P(V_1).P(V_2)$$

$$P(M_6) = P(M_1).P(V_2).P(V_3)$$

$$P(M_7) = P(B_1).P(V_2).P(V_3)$$

$$P(M_8) = P(M_2).P(V_1).P(V_3)$$

$$P(M_9) = P(B_2).P(V_1).P(V_2)$$

Considerando a formulação de LEWIS (1996)

$$\begin{aligned} P\{T\} = & \sum_{i=1}^N P\{M_i\} - \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} P\{M_i \cap M_j\} \\ & + \sum_{i=3}^N \sum_{j=2}^{i-1} \sum_{k=1}^{j-1} P\{M_i \cap M_j \cap M_k\} - \dots \\ & + (-1)^{N-1} P\{M_1 \cap M_2 \cap \dots \cap M_N\} \end{aligned} \quad (4-1.1)$$

Também considerando, que de acordo com LEWIS (1996) é raramente necessário avaliar mais do que os primeiros termos de primeira e segunda ordem para alcançar resultados satisfatórios. A equação que governa a indisponibilidade do sistema é obtida combinando-se a equação (4-1.1) com as definições de corte mínimo apresentadas anteriormente.

A primeira etapa: Utilizando algoritmo genético, propõe-se uma missão de 480 dias com intervalos múltiplos de 15 dias e com retardo de até uma semana (07 dias), pois a discretização do tempo imprescindível ao AG neste problema, não permite a busca de uma frequência igual de testes, com períodos diferentes, para componentes distintos, portanto, para conseguir agendas dentro de um mesmo sistema, com a mesma periodicidade em diferentes componentes, sem que haja desalinhamentos simultâneos propõe-se o *delay* de até uma semana. É válido ressaltar que todas estas considerações estão previstas por LAPA (2001b).

Segunda Etapa: Utilizando PSO, a mesma missão de 480 dias, com intervalos múltiplos de 15 dias, porém sem retardo de uma semana, pois o PSO opera em universo contínuo de busca, isto é, ao contrário do AG ele pode encontrar soluções ótimas sem a restrição de *delay*, pois ele próprio penaliza os testes simultâneos com um alto índice de indisponibilidade, e por isso encontra os testes periódicos em frequências que podem ser iguais porém em datas diferentes.

Para cada etapa dos estudos o PSO e o AG foram acoplados aos programas de cálculo da indisponibilidade, que de acordo com a agenda proposta pelo PSO ou AG são capazes de mensurar a indisponibilidade total do sistema, utilizando a função prêmio e todas as considerações operacionais do sistema eletromecânico dados pela tabela 4.1-1, LAPA (2001b).

	Taxa de falha em Standby (falhas por dias)	Taxa de falha em operação (falhas por horas)	Tempos dos testes (horas)	Tempo dos reparos (horas)
V1	0,000395	0,000095	2	8
V2	0,000395	0,000095	2	8
V3	0,000395	0,000095	2	8
B1	0,00053	0,000142	4	72
B2	0,00053	0,000142	4	72
M1	0,00053	0,000675	4	72
M2	0,00053	0,000675	4	72

Tabela 4.1-1 Condições operacionais do estudo comparativo do sistema eletromecânico hipotético

Dentro da primeira etapa de resolução deste problema, o AG utilizou taxa de mutação de 0,001 e taxa de cruzamento de 0,8 sempre mantidas, e para validar os resultados, as sementes de randomização foram modificadas dez vezes, pois elas são as responsáveis por criar diferentes populações e diversificar os experimentos.

Para o PSO, dentro da segunda etapa de resolução, foram utilizados os valores de aceleração cognitiva iguais a 2,00 ($C_1 = C_2 = 2,00$), respeitando a indicação da literatura ZHANG (2004), ou seja, que a soma de C_1 e C_2 seja aproximadamente igual a quatro; o parâmetro de inércia possui valor decrescente, também em respeito a literatura, variando entre $W_{\max} = 0.5$ e $W_{\min} = 0.2$. Da mesma forma como no AG, a semente de randomização foi modificada dez vezes, isto, para ratificar os resultados obtidos e diversificar o experimento com a criação de diferentes populações.

4.2 Agenda de testes periódicos em grupo gerador a diesel de emergência (GDE).

O segundo experimento computacional compreende o sistema de grupos geradores diesel de emergência, levando em consideração a função prêmio indisponibilidade definida na equação Eq. (3-2.1). O diagrama abaixo é uma ilustração simplificada do sistema, porém traduz exatamente o caso estudo apresentado, ou seja, quatro geradores a diesel em paralelo formando quatro trens e com uma lógica de falha de 4/2, e quanto à ocorrência de falhas são independentes entre si.

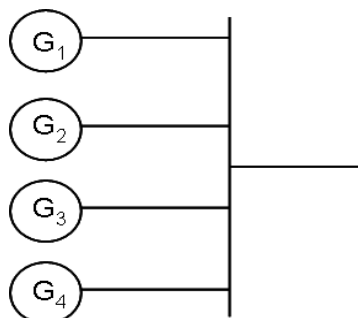


Figura 4.2-1 Diagrama Grupo Gerador a Diesel

Este estudo é feito utilizando um grupo gerador diesel de emergência de uma estrutura PWR padrão, o qual possui 04 (quatro) geradores diesel, sendo dois deles considerados preferenciais.

Considera-se que cada gerador foi projetado para fornecer energia por uma semana sem interrupção e sem realimentação, isto, para alimentar as cargas de segurança do barramento ao qual estão conectados. Ressalta-se que estes grupos não são usados para suprimento de picos de energia, ao contrário, são utilizados somente para uso da energia elétrica de emergência.

O caso de estudo prevê para cada barramento de segurança um gerador diesel de emergência alinhado, pronto para partir e ser conectado, se necessário, após o sinal de partida. Caso os dois geradores preferenciais partam e assumam suas cargas, um deles poderá ser desligado e colocado de prontidão a critério da operação. Outro caso de interesse é quando apenas um deles responde adequadamente às tentativas de acionamento, mesmo nesta circunstância a situação estará controlada, pois um único trem é suficiente para garantir as condições de segurança da usina.

A situação crítica acontece quando nenhum dos geradores preferenciais responde ao sinal de partida ou não aceita as cargas. Neste caso os barramentos de energia estarão sem energia, tentar-se-á conectar um dos dois do grupo reserva em até dez minutos. Através de um estudo realizado por SALDANHA (1996) sobre a avaliação de *Station Blackout*, presentes nos documentos da Westinghouse, pode-se concluir que a recuperação da energia nos barramentos de segurança deve ocorrer em até dez minutos para não danificar os selos das bombas de refrigeração do reator, ou seja, extrapolando os benefícios de uma alta disponibilidade do sistema de geradores a diesel de emergência, existe a responsabilidade com a segurança das instalações da usina nuclear.

Conforme motivações dos parágrafos anteriores, são programados testes periódicos com o intuito de garantir o correto funcionamento do grupo de geradores a diesel, pois através deles, pode-se revelar alguma falha oculta no sistema e assegurar que eles continuem a responder adequadamente às situações para os quais eles foram projetados.

Se durante o teste dos grupos geradores diesel de emergência preferencial houver falha e for detectado que o reparo não poderá ser feito em oito horas, o grupo gerador diesel de emergência de reserva correspondente será testado e colocado pronto. Segundo as especificações técnicas, o teste do segundo grupo gerador diesel de emergência preferencial somente ocorrerá depois que o primeiro for testado e novamente colocado em prontidão. Isto acontece, em justificativa da usina não poder operar sem que haja pelo menos um grupo gerador alinhado. Com um único grupo gerador alinhado, a usina pode funcionar por 08 horas e estará nas Condições Limites de Operação.

Em consonância com o estudo do capítulo dois, pretende-se que este sistema opere sem interrupções, mesmo quando necessário realizar-se testes periódicos. Portanto, conhecendo as taxas de falha de cada um destes componentes durante sua vida útil, poder-se-á calcular a probabilidade de falha e a conseqüente indisponibilidade do sistema com o conceito de corte mínimo, definido como o menor arranjo possível capaz de garantir o total funcionamento do sistema.

Definição de eventos:

G_1 – Evento falha do gerador 1

G_2 – Evento falha do gerador 2

G_3 – Evento falha do gerador 3

G_4 – Evento falha do gerador 4

Formulando as configurações de corte mínimo para este sistema:

$$A = G_1 \cap G_2 \cap G_3$$

$$B = G_1 \cap G_2 \cap G_4$$

$$C = G_1 \cap G_3 \cap G_4$$

$$D = G_2 \cap G_3 \cap G_4$$

$$\text{falha_TOT} = (A \cup B \cup C \cup D)$$

$$P_{\text{falha_TOT}} = P(A \cup B \cup C \cup D)$$

Considerando a fórmula (4-1.1) tem-se:

$$P_{\text{falha_TOT}} = P(A) + P(B) + P(C) + P(D) - P(A \cap B) - P(A \cap C) - P(A \cap D) - P(B \cap C) - P(B \cap D) - P(C \cap D) + P(A \cap B \cap C) + P(A \cap B \cap D) + P(A \cap C \cap D) + P(B \cap C \cap D) - P(A \cap B \cap C \cap D)$$

Supondo os eventos independentes entre si, e aproveitando apenas os termos de primeira, segunda e terceira ordem:

$$P_{\text{falha_TOT}} = P(A) + P(B) + P(C) + P(D) - P(A).P(B) - P(A).P(C) - P(A).P(D) - P(B).P(C) - P(B).P(D) - P(C).P(D) + P(A).P(B).P(C) + P(A).P(B).P(D) + P(A).P(C).P(D) + P(B).P(C).P(D) - P(A).P(B).P(C).P(D)$$

A REGULATORY GUIDE 1.108 (1997) recomenda que a cada 18 meses, ou quando o reator está desligado para recarga, sejam realizados testes simulando a perda de energia externa e simulando o sinal de injeção de segurança. Além disso, LAPA (2003) também destaca que outra prática da usina que prevê um teste a cada 60 dias em todos os geradores do grupo, sendo assim ocorrerão 48 testes mais 4, totalizando 52 testes em uma missão de 720 dias. Assim como LAPA (2003) este trabalho também propõe uma agenda de

testes otimizadas com uso de computação evolucionária, isto, com o propósito de aumentar a disponibilidade do sistema GDE.

Para maior compreensão, o problema foi dividido em duas etapas, ambas com a função prêmio definida na Eq. (3-2.1), como segue.

A primeira etapa: Utilizando algoritmo genético, propõe-se uma missão de 480 dias com intervalos múltiplos de 15 dias e com retardo de até uma semana (07 dias), isto para conseguir, dentro de um mesmo sistema, agendas com a mesma periodicidade em diferentes componentes, sem que haja desalinhamentos simultâneos. É válido ressaltar que todas estas considerações estão previstas por LAPA (2001b).

Segunda Etapa: Utilizando PSO, a mesma missão de 480 dias, com intervalos múltiplos de 15 dias, porém sem retardo de uma semana, pois o PSO opera em universo contínuo de busca, isto é, ao contrário do AG ele pode encontrar soluções ótimas sem a restrição de *delay*, pois ele próprio penaliza os testes simultâneos com um alto índice de indisponibilidade, e por isso encontra os testes periódicos em frequências que podem ser iguais porém em datas diferentes.

Para cada etapa do estudo o PSO e o AG foram acoplados, aos programas de cálculo da indisponibilidade, que de acordo com a agenda proposta pelo PSO ou AG são capazes de mensurar a indisponibilidade total do sistema, utilizando a função prêmio, e todas as considerações operacionais do sistema dados pela tabela 4.2-1 (LAPA 2003).

	Taxa de falha em <i>Standby (falhas por dias)</i>	Taxa de falha em operação (<i>falhas por horas</i>)	Tempos dos testes (<i>horas</i>)	Tempo dos reparos (<i>horas</i>)
G1	0.000395	0.000415	12	36
G2	0,000395	0.000415	12	36
G3	0,000395	0.000415	12	36
G4	0,000395	0.000415	12	36

Tabela 4.2-1 Condições operacionais do estudo comparativo do GDE

Dentro da primeira etapa de resolução deste problema o AG utilizou taxa de mutação de 0,001 e taxa de cruzamento de 0,8 sempre mantidas, e para validar os resultados, as sementes de randomização foram modificadas dez vezes, isto, porque elas são as responsáveis por criar diferentes populações e diversificar os experimentos.

Para o PSO, dentro da segunda etapa de resolução, foram utilizados os valores de aceleração cognitiva iguais a 2,00 ($C_1 = C_2 = 2,00$), respeitando exatamente a indicação da literatura, ou seja, que a soma de C_1 e C_2 seja aproximadamente igual a 4 (quatro); o parâmetro de inércia possui valor decrescente, também em respeito a literatura, variando entre $W_{max} = 0.70$ e $W_{min} = 0.60$. Da mesma forma como no AG, a semente de randomização foi modificada dez vezes, isto, para ratificar os resultados obtidos e diversificar o experimento com a criação de diferentes populações.

4.3 Resultados obtidos

Para o sistema eletromecânico hipotético da figura 4.2-1 foram utilizados os parâmetros listados na tabela 4.3-1 para determinação da indisponibilidade média do sistema.

GA		PSO	
Tamanho da população	200	Tamanho da população	50
Quantidade de gerações	500	Quantidade de gerações	500
Taxa de crossover	0.8	Máximo de inércia	0,5
Taxa de Mutação	0.001	Mínimo de inércia	0,2
Avaliações	100000	Avaliações	25000

Tabela 4.3-1 - Parâmetros PSO x GA do sistema eletromecânico

Com uso dos parâmetros acima e considerando uma missão de 480 dias para a agenda do sistema eletromecânico, foram identificados os seguintes resultados descritos na tabela (4.3-2).

Experimento	População inicial		50 gerações		100 gerações		200 gerações		500 gerações	
	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO
1	0.01478	0.01153	0.00473	0.00447	0.00452	0.00417	0.00418	0.00408	0.00418	0.00407
2	0.01567	0.01839	0.00454	0.00453	0.00413	0.00425	0.00410	0.00410	0.00408	0.00410
3	0.01348	0.01530	0.00467	0.00456	0.00448	0.00428	0.00418	0.00414	0.00418	0.00403
4	0.01667	0.01711	0.00498	0.00432	0.00448	0.00432	0.00419	0.00432	0.00410	0.00419
5	0.01204	0.01359	0.00498	0.00405	0.00430	0.00404	0.00414	0.00401	0.00403	0.00401
6	0.01468	0.01159	0.00473	0.00447	0.00432	0.00419	0.00418	0.00408	0.00418	0.00407
7	0.01577	0.01839	0.00454	0.00443	0.00423	0.00423	0.00412	0.00410	0.00408	0.00410
8	0.01348	0.01530	0.00467	0.00466	0.00459	0.00429	0.00418	0.00414	0.00418	0.00403
9	0.01667	0.01713	0.00455	0.00432	0.00418	0.00431	0.00419	0.00401	0.00410	0.00401
10	0.01334	0.01351	0.00493	0.00405	0.00436	0.00404	0.00411	0.00432	0.00405	0.00419
Desvio Padrão	0,00126	0,00210	0,00014	0,00016	0,00013	0,00008	0,00003	0,00008	0,00005	0,00005
Média	0,01466	0,01518	0,00473	0,00439	0,00436	0,00421	0,00416	0,00413	0,00412	0,00408

Tabela 4.3-2 - Resultados GA x PSO do sistema eletromecânico

De acordo com a tabela 4.3-2 pode-se dizer que o PSO possui a convergência mais rápida do que o AG, além disso, os resultados do PSO são compatíveis com os resultados do AG, pois encontrou resultados globais (0.00401) e médio (0.00408) próximos. O gráfico 4.3.1 mostra a convergência do valor de *fitness* comparando o PSO com o AG.

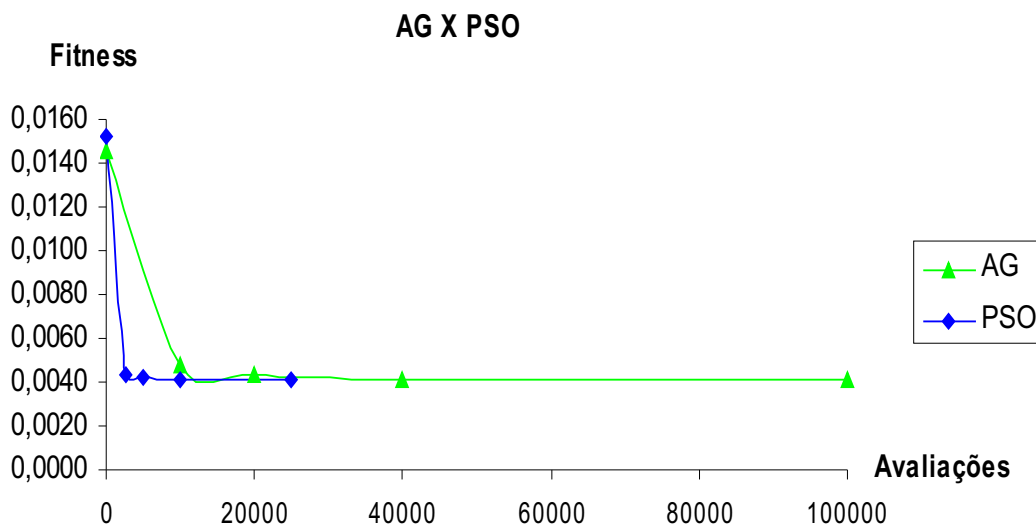


Figura 4.3-1 - Convergência PSO x AG do sistema eletromecânico

Utilizando os melhores resultados do PSO e do AG foram codificadas as seguintes agendas:

Componente	AGENDA PSO
V ₁ (23 Paradas)	25 45 65 85 105 125 145 165 185 205 225 245 265 285 305 325 345 365 385 405 425 445 465
V ₂ (14 paradas)	37 70 103 136 169 202 235 268 301 334 367 400 433 466
V ₃ (14 paradas)	33 65 97 129 161 193 225 257 289 321 353 385 417 449
B ₁ (14 paradas)	37 70 103 136 169 202 235 268 301 334 367 400 433 466
B ₂ (11 paradas)	45 85 125 165 205 245 285 325 365 405 445
M ₁ (7 paradas)	70 136 202 268 334 400 466
M ₂ (11 paradas)	45 85 125 165 205 245 285 325 365 405 445

Componente	AGENDA AG
V ₁ (15 Paradas)	36 66 96 126 156 186 216 246 276 306 336 366 396 426 456
V ₂ (15 paradas)	30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360 390 420 450
V ₃ (15 paradas)	34 63 94 124 154 184 214 244 274 304 334 364 394 424 454
B ₁ (15 paradas)	30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360 390 420 450
B ₂ (15 paradas)	36 66 96 126 156 186 216 246 276 306 336 366 396 426 456
M ₁ (7 paradas)	60 120 180 240 300 360 420
M ₂ (7 paradas)	66 126 186 246 306 366 426

Tabela 4.3-3 – Agendas para o problema do sistema eletromecânico

A solução da agenda de testes periódicos em grupo gerador a diesel de emergência, foi conseguida com uso dos parâmetros listados na tabela 4.3-4.

GA		PSO	
Tamanho da população	200	Tamanho da população	50
Quantidade de gerações	2000	Quantidade de gerações	2000
Taxa de crossover	0.6	Máximo de inércia	0,7
Taxa de Mutação	0.003	Mínimo de inércia	0,6
Avaliações	400000	Avaliações	100000

Tabela 4.3-4 - Parâmetros GA x PSO do GDE

Com uso dos parâmetros da tabela 4.3-4 e considerando uma missão de 480 dias para a agenda do sistema de geradores a diesel de emergência, foram identificados os seguintes resultados descritos na tabela 4.3-5.

Experimento	Semente	População inicial		50 gerações		100 gerações		200 gerações		500 gerações	
		GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO
1	1	0.00122	0.001545	0.00098	0.00098	0.00098	0.00097	0.00097	0.00096	0.00095	0.00095
2	13121979	0.00110	0.001488	0.00097	0.00105	0.00095	0.00098	0.00095	0.00097	0.00095	0.00095
3	121979	0.00141	0.001647	0.00100	0.00106	0.00096	0.00101	0.00095	0.00098	0.00095	0.00095
4	12197	0.00138	0.001261	0.00103	0.00104	0.00099	0.00098	0.00098	0.00095	0.00097	0.00095
5	12345	0.00137	0.001481	0.00099	0.00108	0.00097	0.00100	0.00097	0.00097	0.00095	0.00095
6	89	0.001095	0.001319	0.000993	0.001006	0.000972	0.000989	0.000958	0.000961	0.00094	0.0009611
7	8002	0.001312	0.001283	0.000999	0.001059	0.000982	0.000980	0.000960	0.000976	0.000950	0.0009622
8	88888	0.001188	0.001397	0.001015	0.001054	0.000962	0.001008	0.000956	0.000965	0.000953	0.0009633
9	98765	0.001255	0.001445	0.000998	0.001044	0.000980	0.000986	0.000967	0.000980	0.000959	0.0009594
10	24	0.001381	0.001351	0.000998	0.001044	0.000985	0.001022	0.000959	0.000993	0.000950	0.0009800
Desvio Padrão		0.00010	0.00010	0.00001	0.00002	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
Média		0.00127	0.00142	0.00100	0.00104	0.00097	0.00099	0.00096	0.00097	0.00095	0.00095

Experimento	Semente	1000 gerações		2000 gerações		Tempo total	
		GA	PSO	GA	PSO	GA	PSO
1	1	0.00094	0.00095	0.00094	0.00095	991.1250	121.7960
2	13121979	0.00095	0.00095	0.00095	0.00095	1072.421	124.5470
3	121979	0.00095	0.00095	0.00095	0.00095	998.6090	118.9530
4	12197	0.00097	0.00095	0.00097	0.00095	996.8430	119.9370
5	12345	0.00095	0.00095	0.00094	0.00095	998.7340	117.9220
6	89	0.00094	0.000961	0.00094	0.00096	1081.156	123.0780
7	8002	0.000950	0.000959	0.0009492	0.00095	1124.906	156.7340
8	88888	0.000951	0.000960	0.0009504	0.00095	1009.9060	153.6720
9	98765	0.000959	0.000959	0.0009593	0.00095	1010.3590	192.3750
10	24	0.000950	0.000963	0.0009505	0.00095	1008.5000	145.6090
Desvio Padrão		0.00001	0.00001	0.00001	0.00000		
Média		0.000951	0.000955	0.00095	0.00095	1011.5464	120.6310

Tabela 4.3-5 - Resultados GA x PSO do GDE

De acordo com a tabela 4.3-5 pode-se afirmar que o PSO e o AG possuem resultados compatíveis, especificamente quanto ao valor da indisponibilidade, porém quanto ao número de avaliações existe um ganho expressivo no uso do PSO, pois apresenta resultados compatíveis com o AG usando menos avaliações.

O PSO para processar 2000 gerações usa em média 120,63 segundos enquanto o AG utiliza 1011,54 segundos, isto significa que o AG demora aproximadamente 8 vezes mais do que o PSO para obtenção do mesmo resultado, interessante ressaltar que os experimentos foram feitos em um computador doméstico AMD Turion 64 2.8 GHZ com 512 Mb de memória RAM.

A figura 4.3-2 está relacionada com a tabela 4.3-5 que mostra o comportamento da Fitness por gerações, importante observar que o PSO neste gráfico apresenta uma velocidade de convergência maior do que o AG. Lembrando que a quantidade de avaliações do PSO são inferiores aos do AG e mesmo assim os resultados são compatíveis, provando que o esforço computacional para o PSO é menor.

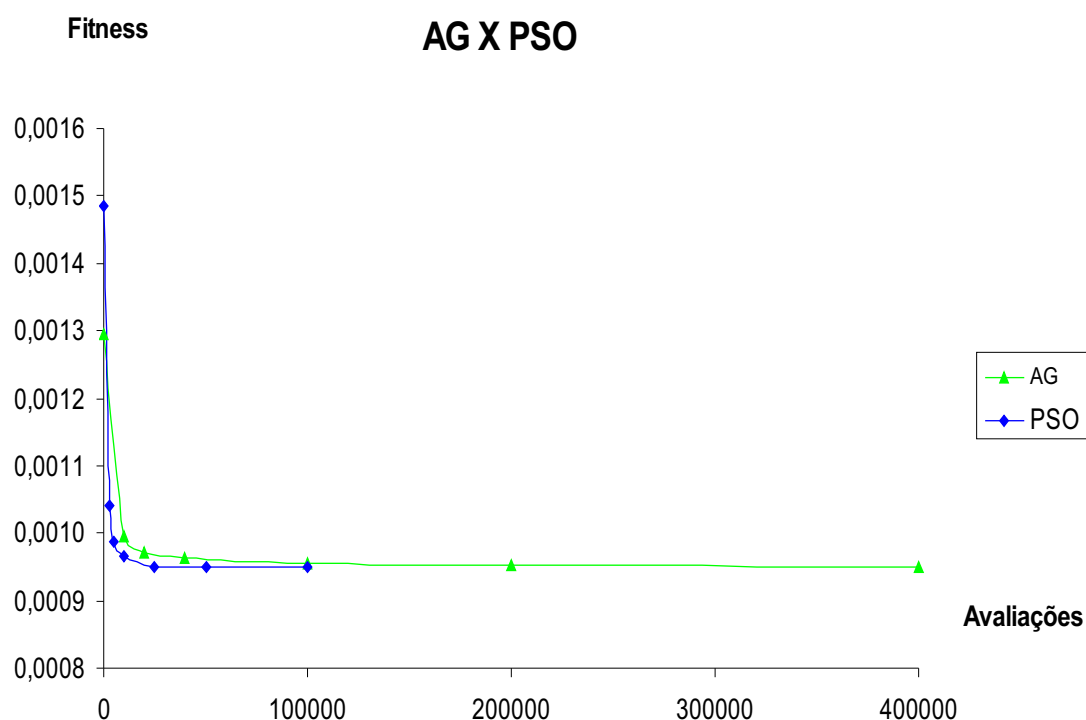


Figura 4.3-2 – PSO x AG Convergência do GDE

Utilizando o melhor resultado da experiência com o PSO ao final de 2000 gerações o valor de indisponibilidade do sistema foi de $9,5 \cdot 10^{-4}$, e a agenda proposta está na tabela 4.3-6.

Componente	Parada 1	Parada 2	Parada 3	Parada 4
G₁	155	-	309	463
G₂	122	241	360	479
G₃	117	234	351	468
G₄	160	317	-	474

Tabela 4.3-6 - Agenda de Testes PSO do GDE

Com o AG ao final de 2000 gerações o valor de indisponibilidade do sistema foi de $9,4.10^{-4}$, e a agenda proposta está na tabela 4.3-7.

Componente	Parada 1	Parada 2	Parada 3	Parada 4
G₁	165	-	317	469
G₂	-	240	-	464
G₃	176	325	-	474
G₄	128	245	362	479

Tabela 4.3-7 - Agenda de Testes AG do GDE

Mais uma vez observa-se que com esforço computacional é bastante inferior com o uso do PSO e ele é capaz de chegar a resultados compatíveis com os obtidos pelo AG.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Desde 2000 pelo menos, o acoplamento do AG em modelos probabilísticos para obtenção de agendas otimizadas de testes periódicos já apresentava resultados interessantes, mesmo com a limitação tecnológica dos processadores da época, ótimas agendas foram alcançadas; na ocasião, problemas de mesmo grau de dificuldade que os apresentados neste estudo levavam em torno de 80 horas para alcançar a solução final, hoje os mesmos problemas, resolvidos com computadores portáteis, são solucionados com menos de 30 minutos de processamento, especificamente para o problema do grupo gerador diesel de emergência (GDE) foram utilizados 16 minutos com o AG e 2 minutos com o PSO.

Entre 2000 e 2006 houve um avanço significativo nas tecnologias de processadores, e além disso, as pesquisas de técnicas de computação evolucionária cresceram em grandes proporções, conforme demonstrado nesta tese. O PSO que é fruto de pesquisas em inteligência artificial, nesta última década ganhou muitas aplicações. Nesta tese o PSO foi investigado para substituir o AG nos problemas de otimização de agendas, resultados obtidos demonstram que o PSO pode substituir o AG, não por ter encontrado soluções muito melhores do que o AG, mas por ter encontrado agendas compatíveis com as do AG com menos avaliações.

Outra motivação para o uso do PSO em problemas de otimização de agendas está na simplicidade do código, que ao contrário do AG que possui restrições com espaços contínuos de busca, tornando a programação muito mais complexa para estes tipos de problema.

Sustentando a afirmação de BAPTISTA (2004) que a adoção de uma ferramenta que ajude na obtenção de uma política otimizada de testes periódicos está diretamente associada à gestão estratégica do conhecimento, acredita-se que o conjunto de

resultados gerados aqui é bastante útil para a formação de conhecimentos para a área, e dessa maneira, buscar-se-á garantir a continuidade das descobertas de conhecimento e soluções e, aumentar o desempenho dos sistemas estudados, que gradualmente vão sendo refinados no processo natural de evolução das metodologias de trabalho.

Mediante os resultados obtidos nesta tese, mostramos a eficiência com que o PSO lida com a resolução de agendamentos de intervenções onde a *fitness* é avaliada pelo modelo probabilístico (LAPA2001b;2002).

Ressalta-se que os sistemas nucleares, por padrão, possuem uma alta disponibilidade média (da ordem de 99.9999%), e ambas as técnicas consideradas estão em consonância com este pré-requisito, pois no problema do GDE, tanto o PSO quanto o AG conseguem propor agendas que respeitam este limite.

Extrapolando as aplicações nucleares e trabalhando com outros sistemas, como por exemplo sistemas que possuem linhas de produção, onde a redundância é mínima e a disponibilidade média aceitável é bem menor (da ordem de 75% a 85%) provavelmente ter-se-ia um enorme ganho ao longo dos anos de operação.

Como proposta para futuras investigações, sugere-se a adoção de uma modelagem multi-objetivo, a fim de agregar um modelo de custos ao processo de obtenção das políticas de testes dos sistemas, bem como um processamento paralelo/distribuído integrado com restrição de vizinhança e elitismo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, M. A. B., MARTINEZ, A. S. AND SCHIRRU, R., 1997, "Adaptive Vector Quantization Optimized by Genetic Algorithms for Real-Time Diagnosis through Fuzzy Sets", *Nuclear Technology*, v.120, n.3, pp. 188-197.

BAPTISTA, R., P., 2004, "Otimização das Políticas de Testes Periódicos de Vigilância em Sistemas Nucleares por Programação Genética", Tese de mestrado, Programa de Engenharia Nuclear COPPE/UFRJ.

BILLINTON, R. AND PAN, J., 1998, "Optimal Maintenance Scheduling in a Two Identical Component Parallel Redundant System", *Reliability Engineering & System Safety*, v.59, pp. 309-316.

BILLINTON, R. AND ALLAN, R. N., 1983, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, New York and London, Plenum Press.

CHAPOT, J. L. C., SILVA, F. C. AND SCHIRRU, R., 1999. "A New Approach to the Use of Genetic Algorithms to Solve Pressurized Water Reactor's Fuel Management Optimization Problem", *Annals of Nuclear Energy*, v.26, n.7, pp.641-655.

CHIANG, J. H AND YANG, J., 2001, "Optimal Maintenance Policy for a Markovian System under Periodic Inspection", *Reliability Engineering and System Safety*, v.71, pp.165-172.

DARWIN, C., 1859, *The Origin of Species by Means of Natural Selection*, London, John

Murray.

DIJKHUIZEN, G. AND HEIJDEN, M., 1999 “Preventive Maintenance and the Interval Availability Distribution of an Unreliable Production System”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.66, pp.13-27.

DUTHIE, J. C., ROBERTSON, M. I., CLAYTON, A. M. AND LIDBURY, D. P. G., 1998, “Risk-based Approaches to Ageing and Maintenance Management”, *Nuclear Engineering and Design*, v.184, pp.27-38.

FESTINGER, L., 1954, “A Theory of social comparison processes”. *Human Relations*, 7, 117-140.

GOLDBERG, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, New York, Addison-Wesley.

GREFENSTETTE, J. J., 1990, *A Users Guide to Genesis - Versão 5.0*.

GROSH, D. L., 1988, *A Primer of Reliability Theory*, New York, John Wiley and Sons.

HAMSEN, E., 1992, *Global Optimization Using Interval Analysis*, New York, Dekker.

HARUNUZZAMAN, M. AND ALDEMIR, T., 1996, “Optimization of Standby Safety System Maintenance Scheduling in Nuclear Power Plants”, *Nuclear Technology*, v.113, pp. 354-367.

HILSMEIER, T. A., ALDEMIR, T. AND VESELY, W. E., 1995, “Time-dependent

Unavailability of Aging Standby Components Based on Nuclear Plant Data”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.47, pp.199-205.

HOLLAND, J. H., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, An Arbor, University of Michigan.

KENNEDY, J., EBERHART, C. R., 2001, *Swarm Intelligence*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers.

KUMAMOTO, H. AND HENLEY, E. J. 1996, *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, New York, IEEE Press.

LAPA, C. M. F. E FRUTUOSO E MELO, P. F., 1996, “Indisponibilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de Angra-I Considerando Falhas de Causa Comum pelo Modelo das Letras Gregas Múltiplas”. Em: *Anais da Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos (COTEQ 96)*, pp. 207-210, Rio de Janeiro, Novembro.

LAPA, C. M. F. E FRUTUOSO E MELO, P. F., 1997, “Estudo da Importância e Sensibilidade dos dos Parâmetros Utilizados na Análise da Confiabilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de Angra-I”, Em: *Anais do XI Encontro Nacional de Física de Reatores (XI ENFIR)*, Poços de Caldas, Brasil.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. E MOL, A. C. A., 1999, “Aplicação de Algoritmos Genéticos na Otimização da Política de Manutenções Preventivas de um Sistema Nuclear Centrada em Confiabilidade”, In: *Proceedings of the 15th Brazilian Congress of Mechanical*

Engineering (COBEM), Águas de Lindóia, Brazil.

LAPA, C. M. F., 1999, “Análise de Confiabilidade Considerando Falhas de Causa Comum – Estudo de Caso Envolvendo um PWR de 4 loops”, *Anais do VI - Congresso Geral de Energia Nuclear (CGEN 99)*, Belo Horizonte, Brasil.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND MOL, A. C. A., 2000a, “Maximization of a Nuclear System Availability through Maintenance Scheduling Optimization Using Genetic Algorithm”, *Nuclear Engineering & Design*, v.196, pp. 95-107.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND FRUTUOSO, P. F. M., 2000b, “Coupled Emergency Diesel Generators-Component Coolant Water System Maintenance Scheduling Optimization Using Genetic Algorithm”, In: *Proceedings of the Fourth FLINS (Fuzzy Logic and Intelligent Techniques in Nuclear Science) Conference on Intelligent Techniques and Soft Computing in Nuclear Science and Engineering*, pp. 519-526, Bruges, Belgium.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. E FRUTUOSO, P. F. M., 2001a, “Otimização de Política de Manutenção Preventiva de Sistemas Industriais por Algoritmos Genéticos usando um Modelo de Confiabilidade e Custos”, Em: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM)*, Uberlândia, Brasil.

LAPA, C. M. F., SAMPAIO, P. A. B. DE, BOTELHO, D. A. AND PEREIRA, C. M. N. A., 2001b, “Dimensioning Reduced Scale Experiments Using Genetic Algorithms”. Em: *Anais do Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais na Engenharia (CILAMCE)*, Campinas, Brasil.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND FRUTUOSO, P. F. M., 2001c, “Surveillance and Diagnostic – Applied Research with Artificial Intelligence”. In: Da Ruan (ed.), *Surveillance Tests Policy Planning through Genetic Algorithms*, 1 ed., Kluwer Academic Publish.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND FRUTUOSO, P. F. M., 2001d, “Nuclear Power Plant Surveillance Tests Optimization by Genetic Algorithm: Application to the Brazilian Nuclear Power Plant Angra-1 Auxiliary Feed-Water System”, *International Journal of Intelligent System*.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND FRUTUOSO, P. F. M., 2002, “Emergency Diesel Generation System Surveillance Test Policy Optimization through Genetic Algorithm Using the Non-Periodic Intervention Method and Considering Seasonal Constraints”, *In: Proceedings of ICONE10: Tenth International Conference on Nuclear Engineering*, Arlington, Virginia, USA. April 14-18, 2002

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A., MELO, P. F. F., 2003, “*Surveillance Test Policy Optimization through Genetic Algorithm Using Non-Periodic Intervention Frequencies and Considering Seasonal Constraints*”, In: Reliability Engineering and System Safety.

LEVITIN, G. AND LISNIANSKI, A., 1999, “Joint Redundancy and Maintenance Optimization for Multistate Series-parallel System”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.64, pp.33-42.

LEVITIN, G. AND LISNIANSKI, A., 2000, “Optimization of Imperfect Preventive

Maintenance for Multi-state System”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.67, pp.193-203.

LEWIS, E. E., 1996, *Introduction to Reliability Engineering*, New York, John Wiley & Sons.

LORENZ, K. (1973). *Behind the Mirror: A Search for a Natural History of Human Knowledge*. New York: Harcourt Brace Jovanovich.

MARSEGUERRA, M. AND ZIO, E., 2000, “Optimization Maintenance and Repair Policies via a Combination of Genetic Algorithms and Monte Carlo Simulation”, *Reliability Engineering & System*, v.68, pp. 69-83.

MARTORELL, S., CARLOS, S., SÁNCHEZ, A. AND SERRADELL, V., 2000, “Constrained Optimization of Test Intervals Using Steady-state Genetic Algorithm”, *Reliability Engineering & System*, v.67, pp. 215-232.

MARTORELL, S., MUNÓZ, A., AND SERRADELL, V., 1996, “Age-Dependent Models for Evaluating Risks & Cost of Surveillance & Maintenance of Components”, *IEEE Transactions on Reliability*, v.45, n.3, pp. 433-441.

MUNÓZ, A., MARTORELL, S. AND SERRADELL, V., 1997, “Genetic Algorithms in Optimizing Surveillance and Maintenance of Components”, *Reliability Engineering & System*, v.57, n.2, pp. 107-120.

NEMHAUSER, G. L. AND WOLSEY, L. A., 1988, *Integer and Combinatorial Optimization*,

New York, John Wiley.

NUNES, M. E. C., PEREIRA, C. M. N. A. AND FRUTUOSO E MELO, P. F., 2000, “Optimization of the Device of Stages Through Genetic Algorithms for Non Markovian Systems Reliability Evaluation: an Application to Nuclear Safety Systems”, In: *Proceedings of the Fourth FLINS (Fuzzy Logic and Intelligent Techniques in Nuclear Science) Conference on Intelligent Techniques and Soft Computing in Nuclear Science and Engineering*, pp. 527-534, Bruges, Belgium.

NUREG/CR-4780, 1988, vol.[1,2], Pickard, Lowe, and Garrick, Inc. Newport Beach. PARK.

D. H., JUNG, G. M. AND YUM, J. K., 2000, “Cost Minimization for Periodic Maintenance Policy of a System Subject to Slow Degradation”, *Reliability Engineering & System*, v.68, pp.105-112.

PEREIRA, C. M. N. A., SCHIRRU, R. AND MARTINEZ, A. S., 1998, Learning an Optimized Classification System from a Data Base of Time Series Patterns Using Genetic Algorithms, In: Ebecken, N. F. F (ed), *Data Mining*, Computational Mechanics Publications, WIT Press, Inglaterra, pp. 20-34.

PEREIRA, C. M. N. A. , SCHIRRU, R. AND MARTINEZ, A. S., 1999, “Basic Investigations Related to Genetic Algorithms in Core Designs”, *Annals of Nuclear Energy*, v.26, n.3, pp.173-193.

PEREIRA, C .M. N. A E LAPA, C. M. F., 2000a, “Computação Evolucionária no Instituto de

Engenharia Nuclear”, Em: *Anais do XII Encontro Nacional de Física de Reatores (ENFIR)*, Rio de Janeiro, Brazil.

PEREIRA, C. M. N. A. AND SCHIRRU, R, 2000b, “Designing Optimized Pattern Recognition Systems By Learning Voronoi Vectors Using Genetic Algorithms”. In: Ebecken, N. F. F (ed), *Data Mining II*, 1 ed., Inglaterra, Computational Mechanics Publications, Wit Press.

PEREIRA C. M. N. A., 2000c, *GACSLIB: Genetic Algorithm Class Library – Uma Biblioteca de Classes para Desenvolvimento de Algoritmos Genéticos sob Paradigma de Orientação a Objetos*, Em: Comunicação Técnica SUFIR-01/00- IEN, Rio de Janeiro, Brasil.

RAJE, D. V., OLANIYA, R. S., WAKHARE, P. D. AND DESHPANDE, A. W., 2000, "Availability Assessment of a Two-unit Standby Pumping System", *Reliability Engineering & System*, v.68, pp. 269-274.

RAMAKUMAR, R., 1993, *Engineering Reliability: Fundamentals and Applications*. New Jersey, Prentice-Hall International.

REGULATORY GUIDE 1.108, 1977, *Periodic Testing of Diesel generator Units Used as Onside Electrical Power Systems at Nuclear Power Plants*. US Nuclear Regulatory commission.

ROZON, D. AND BEAUDET, M., 1992, “Canada Deuterium Uranium Reactor Design Optimization Using Tree-Dimensional Generalized Perturbation Theory”, *Nuclear Science*

and Engineering, v.111, pp.1-20.

SALDANHA, P. L. C., 1996, “Aspectos na Avaliação de Segurança Relacionadas à Perda Total de Energia Elétrica de Corrente Alternada em Centrais Nucleares”. Em: Anais do V congresso geral de energia nuclear (CGEN), pp. 65-70, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

SAMPAIO, P. A. B., LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A., LAPA, N. S., NERI, D. E., SCHIRRU, R., CHAPOT, J.L.C. AND SILVA F.C., 1997, “A Genetic Algorithm Solution for Combinatorial Problems – The Nuclear Core Reload Example”, Em: *Anais do XI Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-Hidráulica (ENFIR)*, pp. 357-360, Poços de Caldas-MG, Brasil.

SIQUEIRA, N. N., PEREIRA C. M. N. A., LAPA, C. M. F., 2005, “*The Particle Swarm Optimization Algorithm applied to Nuclear Systems Surveillance Test Planning*”, International Nuclear Atlantic Conference (INAC), Santos-SP, Brasil.

SUNDARARAJAN, C., 1991, *Guide to Reliability Engineering: Data, Analysis, Applications, Implementations and Management*, New York, Van Nostrand Reinhold Press.

VAN NOORTWIJK, J., DEKKER, R. AND MAZZUCHI, T., 1992, “Expert Judgement in Maintenance Optimization”, *IEEE Trans. Reliability*, v.41, pp. 427-432. VAURIO, J. K., 1997, “On Time-dependent Availability and Maintenance Optimization of Standby Units under Various Maintenance Policies”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.56, pp.79-89.

WEIBULL, W. 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", *Journal of Applied Mechanics*, September Edition, pp. 293-297.

YANG, J. E., SUNG, T. Y. AND JIN, Y. 2000, " Optimization of the Surveillance Test Interval of the Safety Systems at the Plant Level", *Nuclear Technology*, v.132, pp.352-365.

ZHANG Li-ping (张丽平), YU Huan-jun (俞欢军), HU Shang-xu (胡上序), 2004, "*Optimal choice of parameters for particle swarm optimization*", Department of Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China.