



APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA OTIMIZAÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÕES PREVENTIVAS DE UM SISTEMA NUCLEAR CENTRADA EM CONFIABILIDADE

Celso M. Franklin Lapa
Cláudio M. N. A. Pereira
Antônio C. de Abreu Mol

Instituto de Engenharia Nuclear - CNEN
Caixa Postal 68 550 – Cep: 21945-970, Rio de Janeiro, Brasil

***Resumo.** O presente artigo apresenta um solução baseada em algoritmos genéticos para otimização da política de agendamentos das manutenções preventivas realizadas em um sistema real pertencente a uma central nuclear de potência. Tal metodologia visa maximizar a disponibilidade potencial média de um sistema industrial pela seleção de uma política de manutenções preventivas baseada tanto no seu histórico operacional quanto em suas restrições técnicas de projeto. Os resultados obtidos, quando comparados com aqueles produzidos por política padrão de manutenção, revelam ganhos no que concerne ao desempenho e a segurança operacional do sistema.*

***Palavras-chave:** Otimização em Manutenção, Algoritmos Genéticos, Confiabilidade*

1. INTRODUÇÃO

O projeto e a operação de uma central nuclear envolvem problemas e situações que podem encontrar soluções na pesquisa em computação neural e evolucionária. Não obstante, somente nos últimos anos alguns pesquisadores e engenheiros nucleares lançaram mão de técnicas como redes neuronais e algoritmos genéticos para resolver problemas calcados em soluções providas do reconhecimento de padrões e na otimização de processos. Segundo Duthie (1998), ainda é extremamente baixo o número de trabalhos na engenharia nuclear que utilizam a análise de risco para o estabelecimento das políticas de manutenções preventivas de sistemas em *standby*. Ainda menos frequente, com raras exceções [Munõz (1997) e Levintin (1999)] é a utilização de ferramentas computacionais avançadas para se procurar uma combinação otimizada entre custo econômico-operacional das manutenções e os ganhos operacionais provindos destas. A idéia deste trabalho apoia-se na aplicabilidade de uma técnica de computação evolucionária como solução de um problema pertencente à uma das áreas de maior relevância econômica e operacional da engenharia nuclear: análise probabilística de segurança. Na indústria nuclear, a presença de sistemas de segurança absolutamente confiáveis, constitui-se não somente numa especificação técnica, mas numa exigência para o licenciamento e controle da instalação. Cabe colocar, que a capacidade de um sistema eletromecânico responder satisfatoriamente à uma demanda propiciada por uma situação crítica de

segurança está profundamente relacionada com a política de manutenção preventiva ao qual foi submetido durante sua vida operacional. O estabelecimento desta política, no entanto, é um problema com alto grau de liberdade e que admite incontáveis soluções tecnicamente viáveis. Sendo assim, é necessária a utilização de uma técnica de otimização para se chegar a uma combinação ótima entre os ganhos oriundos da manutenção preventiva, a perda de disponibilidade local quando se desalinha um componente para realizar manutenção, as limitações de segurança que impedem certas combinações cumulativas de desalinhamentos e por último, os tempos nos quais se deve realizar cada manutenção e em qual componente esta deve ser realizada para propiciar o melhor ganho possível de disponibilidade do sistema como um todo. Pelo entendimento destas questões, conclui-se que o comportamento da indisponibilidade média de um sistema razoavelmente complexo em função dos tempos nos quais seus componentes fazem manutenção constitui-se em um hiper-espaço de topologia complicada onde a determinação do ponto ótimo requer a aplicação de uma técnica poderosa.

O presente trabalho apresenta uma modelagem baseada em algoritmos genéticos (AG) - (Holland, 1975, Goldberg, 1989) que é capaz de propor uma combinação entre os agendamentos para as manutenções preventivas de cada componente de um sistema nuclear a fim de maximizar sua disponibilidade e minimizar seus períodos de desalinhamento para reparo. Adotou-se como caso exemplo o sistema de água de alimentação auxiliar (AFWS) de um usina PWR de dois *Loops / Westinghouse*, tal como Angra-I.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição do sistema.

Segundo Lapa (1996) o AFWS tem resumidamente as seguintes funções de projeto: a) manter inventário nos geradores de vapor (GV's) a fim de proporcionar a remoção de calor gerado pelos produtos de fissão até a entrada do sistema de remoção de calor residual (RHR); b) manter níveis de água nos GV's para a remoção do calor gerado pelo reator em baixa potência. Em resumo, o AFWS permanece pronto para partir quase na totalidade do tempo na qual a usina encontra-se em potência e é acionado justamente quando a usina é desligada por razões de segurança ou para uma parada planejada. Claro está, que mesmo que seja possível se realizar algumas manutenções preventivas no período no qual a usina está desligada, são necessárias, segundo o relatório operacional do grupo de segurança de Angra-I – GSE (1995), algumas manutenções durante o período no qual a instalação opera e o AFWS encontra-se no estado pronto para partir. Segue um esquema básico simplificado (Figura 1) idealizado a partir da planta original e que serviu de base para este trabalho.

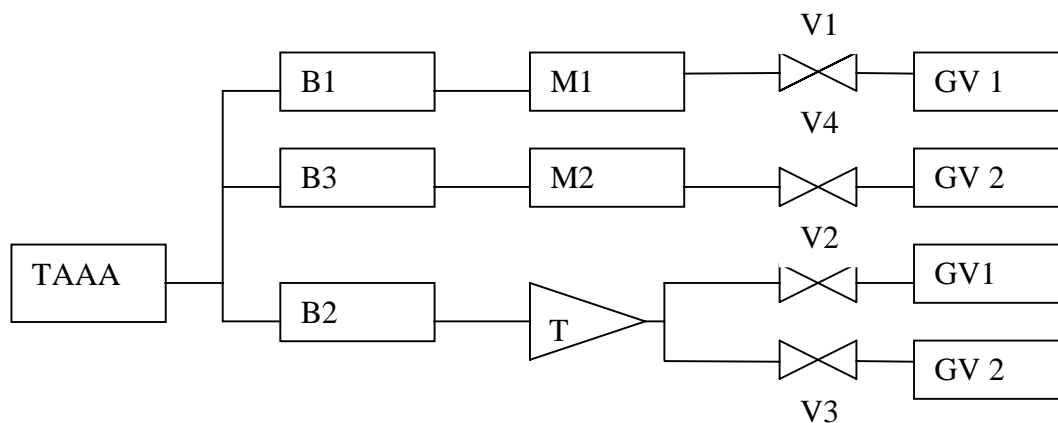


Figura 1 - Esquema básico simplificado

Onde: B1, B2 e B3 são as bombas do sistema, M1 e M2 os motores elétricos, T a turbina e V1, V2, V3 e V4 as válvulas de injeção de inventário nos GV's.

2.2. Modelagem probabilística de segurança.

A avaliação quantitativa do sistema pressupõe que se estabeleça o critério de falha: o evento topo para o AFWS é o não fornecimento ou fornecimento insuficiente de água de alimentação para ambos os GV's de maneira a impossibilitar a execução de suas funções de projeto. Sejam Top o evento topo e M_1, M_2, \dots, M_n os cortes mínimos do sistema, assim:

$$\text{Top} = M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_n \quad (1)$$

$$p\{\text{Top}\} = p\{M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_n\} \quad (2)$$

Utilizando relações conhecidas da álgebra booleana (Shoorman, 1990), tem-se:

$$p\{\text{Top}\} = \sum_{i=1}^N p\{M_i\} - \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} p\{M_i \cap M_j\} + \sum_{i=3}^N \sum_{j=2}^{i-1} \sum_{k=1}^{j-1} p\{M_i \cap M_j \cap M_k\} \\ + \dots + (-1)^{N-1} p\{M_1 \cap M_2 \cap \dots \cap M_N\} \quad (3)$$

A probabilidade de um corte mínimo qualquer M_i em função de seus eventos básicos é:

$$p\{M_i\} = p\{X_{i1} \cap X_{i2} \cap X_{i3} \cap \dots \cap X_{im}\} \quad (4)$$

Fazendo a transição da álgebra booleana para a fundamental para possibilitar a quantificação de $p(\text{Top})$ através das taxas de falha dos componentes e admitindo independência entre os eventos que compõem cada corte (não considerou-se a influência das falhas de causa comum) pode-se escrever $p(\text{Top})$ truncada no terceiro termo (Lewis, 1987):

$$p\{\text{Top}\} = \sum_{i=1}^N p\{M_i\} - \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} p\{M_i \times M_j\} + \sum_{i=3}^N \sum_{j=2}^{i-1} \sum_{k=1}^{j-1} p\{M_i \times M_j \times M_k\} \quad (5)$$

Necessita-se estimar as probabilidades dos eventos básicos que compõem os cortes mínimos (Tabela 1). A hipótese de independência entre os eventos permite que as interseções da Eq.(4) sejam expressas por produtos, possibilitando assim o cálculo dos diversos $p(M_i)$'s através dos eventos básicos (V1, V2, V3, V4, B1, B2, B3, M1, M2, T e C).

Tabela 1–Cortes mínimos do sistema

Primeira ordem	P(1)=C
Segunda ordem	não existem
Terceira ordem	P(3)=V1*V4*T, P(4)=V1*B2*B3, P(5)=V1*B3*T, P(6)=V1*M2*B2, P(7)=V1*M2*T, P(8)=V4*B1*B2, P(9)=V4*B1*T, P(10)=V4*M1*B2, P(11)=V4*M1*T, P(12)=B1*B2*B3, P(13)=B1*B2*M2, P(14)=T*B1*B3, P(15)=B2*B3*M1, P(16)=B1*M2*T, P(17)=B2*M2*M1, P(18)=B3*M1*T, P(19)=M1*M2*T, P(19)=M1*M2*T
Quarta ordem	P(20)=V1*V2*V3*V4, P(21)=V1*V2*V3*B3, P(22)=V1*V2*V3*M2, P(23)=V2*V3*V4*B1, P(24)=V2*V3*V4*M1, P(25)=V2*V3*B1*B3, P(26)=V2*V3*B1*M2, P(27)=V2*V3*M1*B3, P(28)=V2*V3*M1*M2

Segundo Lewis (1987), a evolução da probabilidade de falha de um dado componente, que é reparado a cada intervalo de tempo constante Tm , em função do tempo t (tempo ao qual este permaneceu pronto para partir) pode ser bem representado pela seguinte equação:

$$\tilde{A}(t, Tm, N) = 1 - \left\{ EXP \left[-N \left(\frac{Tm}{\theta} \right)^m \right] EXP \left[- \left(\frac{t - NTm}{\theta} \right)^m \right] \right\} \quad (6)$$

Onde N é o número de manutenções que foram realizadas até um dado instante t , e ainda, m e θ são o fator de forma e a vida característica do componente. Estes últimos são parâmetros da distribuição Weibull e devem ser estimados considerando-se as características operacionais e o histórico de falhas de cada componente. Esta equação pode ser generalizada para um intervalo variável de tempo entre cada manutenção e acrescida de um termo que represente a evolução da probabilidade de falha desde sua entrada em operação. Assim, pode-se escrever a equação que refletirá o comportamento da probabilidade de falha de cada um dos dez componentes para a próxima missão e com a possibilidade de qualquer intervalo de tempo entre as manutenções agendadas (neste caso, como o sistema permanece no estado pronto para partir a probabilidade de falha pode ser entendida como a indisponibilidade de cada componente). É importante lembrar que os termos constantes utilizados nas equações a seguir foram estimados de maneira a expressar um comportamento típico que somente exemplifique cada componente. Sendo assim, estas equações não têm a pretensão de refletir o comportamento fidedigno de cada componente deste sistema, mas somente desenvolver uma modelagem de confiabilidade que sirva de objeto à intenção maior deste trabalho que é a otimização dos agendamentos das manutenções preventivas de um sistema. Com isto a Eq. (6) pode ser estendida aos dez eventos básicos da Tabela 1.

$$p(t, J) = 1 - \left\{ KJ * EXP \left[- \left((t - Tm(ult)) / \theta J \right)^{mJ} \right] * \left[\prod_{I=1}^{ult} EXP \left[- \left((Tm(I) - Tm(I-1)) / \theta J \right)^{mJ} \right] \right] \right\} \quad (7)$$

onde: $p(t,1)=V1$, $p(t,2)=V2$, $p(t,3)=V3$, $p(t,4)=V4$, $p(t,5)=B1$, $p(t,6)=B2$, $p(t,7)=B3$, $p(t,8)=M1$, $p(t,9)=M2$

$$C = 1 - EXP[-\lambda C] \quad (8)$$

O índice J indica a qual componente do sistema, com exceção do tanque de alimentação, estamos nos referindo (ex: se $J=1$ estamos nos referindo à válvula 1 cujo termo algébrico representativo de sua probabilidade de falha é $V1$, etc). Os diversos KJ 's estão diretamente relacionados ao histórico operacional de cada componente até o instante ao qual deseja-se estabelecer uma política de manutenção preventiva. A variável t representa o tempo desde que o componente foi posto em linha ou encontra-se no estado pronto para partir, dependendo da natureza do sistema, até o instante ao qual deseja-se saber a probabilidade de falha deste. A variável $Tm(ult)$ representa o tempo da última manutenção realizada naquele componente até o instante t . Os termos θJ 's e os termos $m J$'s são respectivamente, como já citado, a vida característica e o fator de forma de cada componente. Estes, assim como os diversos KJ 's, encontram-se na Tabela 2. Os termos $Tm(I)$ referem-se aos tempos agendados para as manutenções preventivas de cada componente e a variável do produtório ult indica a última manutenção que foi realizada naquele componente até o instante t . Finalmente, λC está relacionada à taxa de falha constante do tanque de água de alimentação e descreve a probabilidade deste não fornecer inventário ao sistema. Em função desta taxa de falha ser constante as manutenções preventivas não são recomendadas para este componente.

As Eq's.(7-8) fornecem as probabilidades de ocorrência de cada corte mínimo. Obtidos as $p(M_i)$'s estas são computadas segundo a Eq. (5) o que conduz ao cálculo da probabilidade de evento topo, que no caso estudado, será a indisponibilidade do sistema em função de t , dos $Tm(I)$ de cada componente e dos $Tm(ult)$ de cada componente. Contudo, o que deseja-se obter, é uma maior disponibilidade média para o sistema durante o intervalo de tempo no qual este permaneceu pronto para partir [tempo da missão ($Tmis.$)] dado um agendamento de manutenções preventivas para cada componente. Para tal deve-se realizar a integração da probabilidade de evento topo no período de interesse, como segue:

$$\tilde{A}_{med} [Tmis., Tm(I), Tm(ult)] = \frac{1}{Tmis.} \int_0^{Tmis.} \tilde{A}[t, Tm(I), Tm(ult)] dt \quad (9)$$

Considera-se, por premissa, que cada componente retorna à linha na condição “tão bom quanto novo” (Lewis, 1987). Outra importante hipótese é a admissão de que no período de tempo no qual um determinado integrante do sistema permaneceu em manutenção (Tabela 2), este foi considerado desalinhado e portanto contribuiu com indisponibilidade própria 1 para o cômputo geral, em substituição as Eq's.(7-8). Desta forma, tem-se que arranjo ótimo entre estas manutenções, considerando-se todas as condições descritas anteriormente, é um importante problema de otimização num espaço de topologia complicada.

2.3. Modelagem genética.

O arcabouço representativo da política de agendamentos candidata a solução do proposto problema de otimização é expressa por 10 vetores cujos elementos são os tempos de manutenção de cada um dos 10 componentes do sistema. Adotou-se uma discretização mínima de 1 mês (30 dias) na representação do eixo tempo, desta forma, o genótipo foi modelado para que pudesse representar agendamentos que possuísem desde 0 até 26 manutenções ao longo dos 810 dias, em quaisquer meses e para qualquer um dos componentes do sistema. Seguindo o paradigma clássico dos algoritmos genéticos, utilizou-se um genótipo de tamanho fixo. Cada gene contém as paradas de um componente e é representado por um *string* binário de 26 bits, onde o valor 1 significa que o componente está em linha e pronto para partir e valor 0 significa que este foi selecionado para realizar sua manutenção no respectivo mês (as paradas são agendadas, por hipótese, nos dias múltiplos de 30 contados a partir do instante no qual o sistema foi colocado em *standby*). O genótipo, formado pela concatenação de todos os genes e portanto com 260 bits, está ilustrado na Figura 2 juntamente com a decodificação do respectivo fenótipo (vetores de tempos).

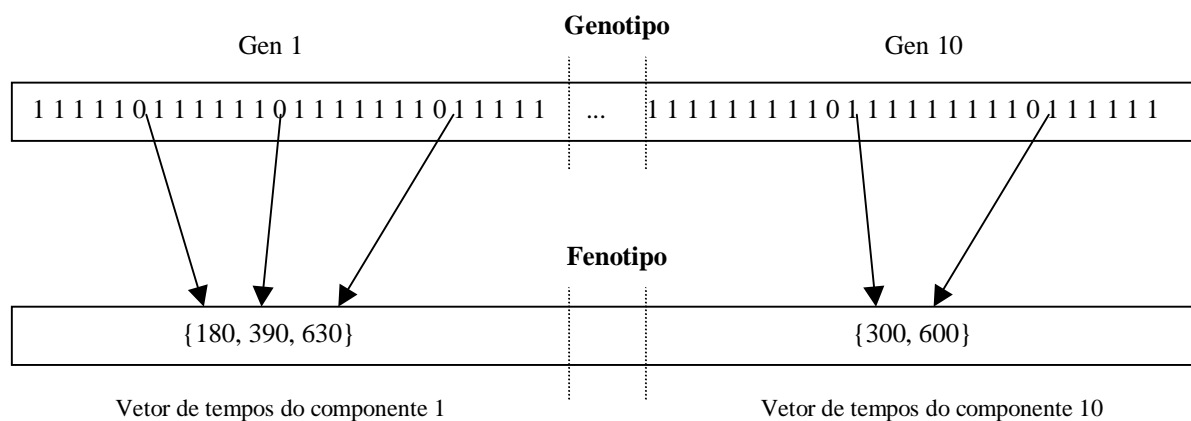


Figura 2 - Um exemplo do genótipo proposto.

O genótipo então apresentado é flexível para inúmeras outras faixas de discretização (dia a dia, semana a semana, etc.), no entanto, existe, obviamente, um limitador relativo ao custo computacional necessário para tais níveis de discretização temporal. No caso deste trabalho, o conhecimento especialista apontou um interstício mínimo de 1 mês como sendo uma discretização razoável, dado que intervalos menores entre manutenções preventivas são descartáveis do ponto de vista operacional e econômico. O prêmio de cada genótipo é a indisponibilidade média do sistema mediante a uma política de agendamento de manutenção prevista no fenótipo e calculada segundo a modelagem probabilística descrita anteriormente, ou seja:

$$f = A(\vec{t}_1, \dots, \vec{t}_{10}) \quad (10)$$

3. RESULTADOS OBTIDOS

De forma a avaliar a metodologia proposta, dois problemas de otimização são analisados neste trabalho. O primeiro, **caso 1**, retrata a hipótese do sistema permanecer no estado pronto para partir por três ciclos básicos hipotéticos de 270 dias, sem poder realizar manutenções preventivas durante a parada do reator, consistindo, assim, numa missão ininterrupta de 810 dias. Esta hipótese é extrema, porém possível para uma instalação comercial, dado que existe urgência econômica na retomada da geração energética e durante as paradas para troca do combustível nuclear o sistema pode encontrar-se totalmente demandado seja para retirada de calor residual ou para o tratamento químico do secundário. A segunda hipótese, **caso 2**, assume que todos os componentes do sistema sofrem manutenções preventivas durante as paradas para recarga e estas, desta forma, não implicam em prejuízo para a indisponibilidade daquele dia, visto que o sistema não encontrava-se na condição pronto para partir, resultam somente no ganho de operacionalidade relativo às manutenções. A modelagem genética sugeriu, como citado, dois conjuntos de agendamentos de manutenções os quais propiciaram, de acordo com a Eq. (5), o comportamento da indisponibilidade dia a dia do sistema para ambos os casos anteriores. Estes resultados são comparados com políticas típicas de manutenções para sistemas com componentes em paralelo (componentes semelhante são permutados com um intervalo de tempo constante entre cada manutenção) e com o comportamento que o sistema apresentaria se não fosse realizada manutenção.

Tendo colocado todas as condições admitidas nesse trabalho e estando claro que objetivava-se o desenvolvimento e a apresentação de uma modelagem genética que acoplada a um modelo probabilístico é capaz de: dadas as condições operacionais de um sistema industrial qualquer, propor uma política de agendamentos para as manutenções preventivas que maximiza o desempenho operacional deste sistema, seguem-se os resultados obtidos.

Inicialmente apresenta-se (Figura 3) a evolução da indisponibilidade do AFWS com o agendamento proposto pela modelagem genética (linha 2) em contraste com o resultado que obter-se-ia caso não fosse realizada nenhuma manutenção durante a missão hipotética de 810 dias (linha 1). O AG foi modelado com uma população fixa de 300 indivíduos e tal número foi conseguido após alguns testes com populações menores que conduziram à possíveis ótimos locais que não satisfaziam aos valores mínimos procurados, ou seja: a indisponibilidade média obtida nestes ótimos locais era da mesma ordem ou superior ao valor que obter-se-ia caso não se realizasse nenhuma manutenção. A taxa de mutação admitida, 0.1%, foi estabelecida no sentido de promover diversidade na busca mas, tendo como preocupação relevante não se inviabilizar a convergência num espaço de topologia tão acidentada. Seguem-se, pois, a Figura 3 e a Tabela 2, com os tempos propostos pelo AG para as manutenções preventivas de cada componente.

Tabela 2 – Agendamentos do AG na hipótese de não se realizar manutenção nas paradas

	1ª PARADA	2ª PARADA	3ª PARADA	4ª PARADA	5ª PARADA
VÁLVULA 1	60	120	210	330	450
VÁLVULA 2	90	270	390	540	-
VÁLVULA 3	30	180	420	510	-
VÁLVULA 4	90	150	240	360	480
BOMBA 1	120	210	330	450	-
BOMBA 2	180	390	-	-	-
BOMBA 3	150	300	480	-	-
MOTOR 1	120	210	330	450	-
MOTOR 2	150	300	480	-	-
TURBINA	180	390	-	-	-

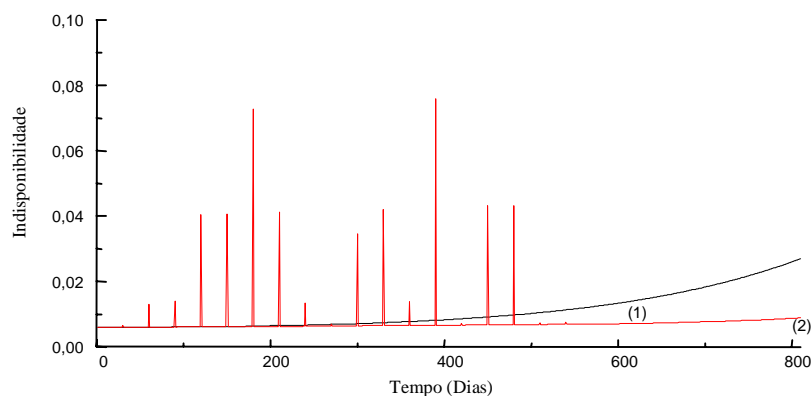


Figura 3 – Indisponibilidade sem manutenções comparada com a obtida pela política do AG.

A indisponibilidade média para a hipótese de não se realizar nenhuma manutenção (linha 1) é cerca de $1,0807 \times 10^{-2}$ (Tab. 3) e o seu valor pontual atinge ao final da missão a preocupante e irreversível marca de $2,695 \times 10^{-2}$, enquanto a indisponibilidade média, oriunda da política proposta pelo AG (Tabela 2), é cerca de $0,7276 \times 10^{-2}$ (Tab. 3) e como pode-se observar pela Figura 3 com uma tendência de ascensão muito discreta, contrastando claramente com a tendência de crescimento exponencial apresentado pela curva 1.

As Figuras [4-5] apresentam respectivamente, como subsídio para eventuais comparações, duas políticas tradicionais de manutenção onde os trens de componentes são desalinhados ciclicamente com alta (curva 3) e baixa (curva 4) frequências de desalinhamento em contraste com a curva 1 que expressa o comportamento da indisponibilidade sem manutenções. Os resultados das indisponibilidades médias para estas situações encontram-se na Tabela 3.

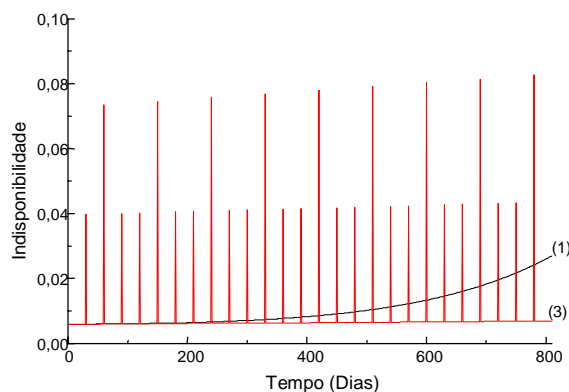


Figura 4–Alta frequência c/ intervalos fixos

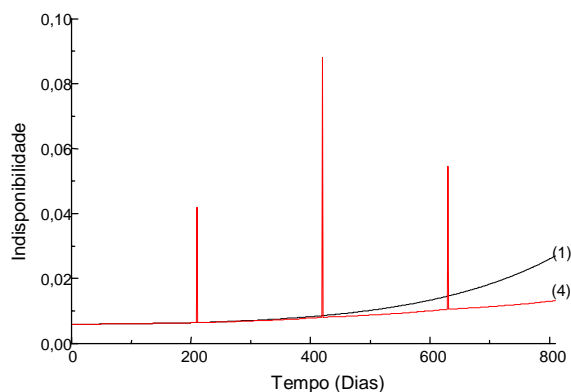


Figura 5–baixa frequência c/ intervalos fixos

Tabela 3 – Indisponibilidades médias (caso 1)

	Indisponibilidade média
Sem manutenções	1,0807xE-2
AG	0,7276xE-2
Alta frequência de manutenções	0,7942xE-2
Baixa frequência de manutenções	0,7517xE-2

Analisando-se as Figuras [4-5] e a Tabela 3 pode-se verificar que a política de manutenções preventivas proposta pelo AG, não somente conduziu a indisponibilidade média do sistema à níveis que um especialista dificilmente seria capaz de conseguir mas também obteve, surpreendentemente, dado que não objetivávamos prioritariamente os resultados para a indisponibilidade pontual ao final do período de *standby*, um valor muito superior ao da política com baixa frequência e um resultado da mesma ordem, daquele proporcionado pela política com alta frequência de manutenções. Isto indica, respectivamente, uma maior longevidade operacional do que se teria com a política da Fig. 5 com um número semelhante de paradas (Tabela 2) ou uma economia relevante em comparação com a política da Fig. 4 (menos manutenções) sem prejuízo à longevidade operacional.

O caso 2 refere-se à hipótese do sistema ser inteiramente reparado durante os períodos onde a usina está renovando o seu combustível nuclear. Logo, as manutenções são feitas sem prejuízo para a indisponibilidade local do sistema dado que nestas circunstâncias, após o período onde o AFWS é solicitado (remoção do calor residual e tratamento químico do secundário) pode-se, ainda, realizar uma bateria de manutenções antes do sistema voltar à linha. Seguem-se as Figuras [6-7] onde a indisponibilidade oriunda da política de manutenções sugerida pelo AG é contrastada com a obtida caso o sistema realizasse apenas as manutenções sem ônus durante a parada para recarga (Figura 6) e o comportamento da indisponibilidade para as mesmas políticas típicas de manutenções do caso 1 (Figura 7).

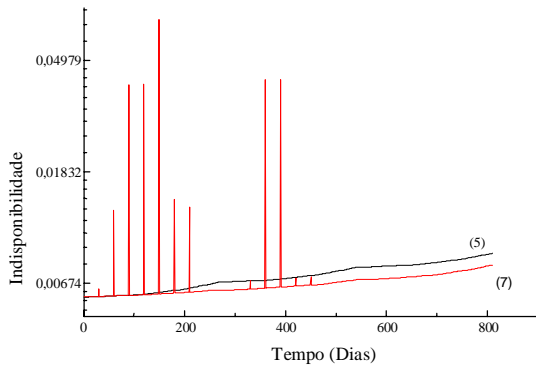


Figura 6 – $\tilde{A}(t)$ proposta pelo AG versus $\tilde{A}(t)$ com manutenções na recarga

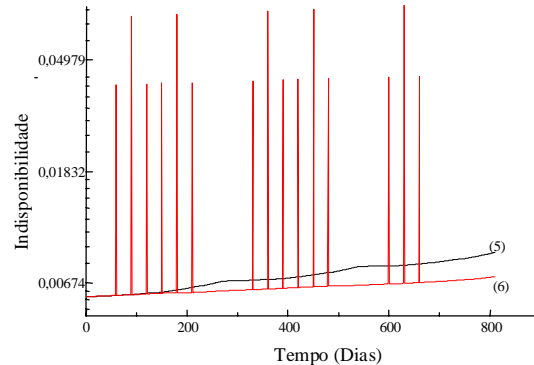


Figura 7 – $\tilde{A}(t)$ proposta pelo AG versus $\tilde{A}(t)$ com manutenções na recarga

A linha 5 da Figura 7 descreve o comportamento da indisponibilidade média apenas com as manutenções realizadas durante a recarga. É claramente identificável a mudança na taxa de crescimento da curva nestes instantes (dia 270 e 540). A linha 6 simboliza a indisponibilidade do AFWS com uma política de alta frequência de manutenções. Não obstante ao fato da indisponibilidade pontual ao final da missão ser inferior ao obtido apenas pelas manutenções nas paradas, a indisponibilidade média (objetivo maior da análise de segurança) é, segundo exposto na Tabela 4, bem maior do que obter-se-ia apenas realizando-se manutenções nas recargas. A linha 7 da Figura 6 representa o comportamento da indisponibilidade do sistema

quando pratica-se a política de manutenções preventivas proposta pelo AG. A análise da Figura 6 e os números da Tabela 4 traduzem a superioridade da política proposta pelo AG em ambos os aspectos: econômico e operacional. A indisponibilidade média é bastante inferior à ambos os casos e com bem menos manutenções do que na hipótese de alta frequência e com apenas algumas intervenções a mais das realizadas durante a recarga (Tabela 5). Cabe colocar, embora não seja o objetivo específico deste trabalho, que o resultado pontual obtido pelo AG ao final da missão é levemente superior ao conseguido por uma política com alta frequência de manutenções. Contudo o que se deve esperar de um sistema em standby é que este esteja sempre pronto para partir com a menor probabilidade de falha possível e que muitas manutenções geram forçosamente muitos momentos de alta probabilidade de falha pela redução necessária do nível de redundância quando as manutenções estão sendo realizadas. Caso fosse necessário, por questões de longevidade operacional ou outras razões de segurança, poder-se-ia, colocar a probabilidade de falha ao final de uma missão qualquer como um dos fatores a serem otimizados.

Tabela 4 – Indisponibilidades Médias (caso 2)

	Indisponibilidade média
Apenas com manutenções na recarga	0,7170xE-2
AG	0,6947xE-2
Alta frequência de manutenções	0,7314xE-2

Tabela 5 – Agendamentos do AG na hipótese se realizar manutenção nas paradas para recarga

	1ª PARADA	2ª PAR.	3ª PAR.	4ª PAR.	5ª PAR.	6ª PAR.
VÁLVULA 1	60	120	210	270	360	540
VÁLVULA 2	30	180	270	420	540	-
VÁLVULA 3	150	270	330	450	540	-
VÁLVULA 4	90	180	270	390	540	-
BOMBA 1	120	270	360	540	-	-
BOMBA 2	150	270	540	-	-	-
BOMBA 3	90	270	390	540	-	-
MOTOR 1	120	270	360	540	-	-
MOTOR 2	90	270	390	540	-	-
TURBINA	150	270	540	-	-	-

Deve ficar claro que a metodologia então apresentada (Otimização por Algoritmos Genéticos / Política de Manutenções Baseada em Análise Probabilística de Segurança) é capaz de buscar um agendamento para as manutenções preventivas de qualquer sistema que possua um bom histórico operacional de componentes e que este agendamento proporciona uma maximização do desempenho operacional deste sistema minimizando probabilidades de falhas e intervenções para manutenções. O limite para tamanho do sistema a ser analisado (número de componentes) esbarra somente no custo computacional e num bom histórico de falhas para garantir o ajuste estatístico de cada componente à família de distribuições Weibull que deve descreve-lo quanto a sua probabilidade de falha. A metodologia possibilita, ainda, que sejam criados alguns limitadores econômicos explícitos ou estabelecidos certos impedimentos de combinações máximas para desalinhamentos simultâneos, ou seja: pode-se ajustar a modelagem às condições específicas de cada situação real. Cabe investir, entretanto, na incorporação dos impactos das falhas de causa comum (FCC's) na metodologia de confiabilidade então apresentada, dado que sistemas nucleares de segurança apresentam altos

níveis de redundância e portanto, estes modos de falhas têm razoável contribuição para a probabilidade de falha. Assim, tem se trabalhado na tentativa de se adaptar alguns modelos paramétricos para tratamento de FCC's (Modelo do Fator • , Modelo das Letras Gregas Múltiplas) à metodologia de obtenção das taxas de falhas usadas na distribuição Weibull.

4. REFERÊNCIAS

- 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 184, 27-38.
- Final Safety Analysis Report for Angra-1 Nuclear Power Plant, Westinghouse Electric Corporation, 1979.
- Goldberg, D. E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley.
- Holland, J. H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, An Arbor, University of Michigan.
- Lapa, C. M. F., 1996. Análise de Confiabilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de Angra-I Considerando Falhas de Causa Comum pelo Modelo das Letras Gregas Múltiplas. Master Thesis, Nuclear Engineering Department, COPPE /UFRJ, Brazil.
- Lapa, C. M. F. e Frutuoso e Melo, P. F., 1996. Indisponibilidade do Sistema de Água de Alimentação Auxiliar de Angra-I Considerando FCC pelo Modelo das Letras Gregas Múltiplas. Annals of Equipment Technology Meeting (COTEQ 96), Rio de Janeiro.
- Levitin, G. e Lisnianski, A., 1999. Joint Redundancy and Maintenance Optimization for Multistate Series-Parallel System. Reliability Engineering & System Safety 64, p 33-42.
- Lewis, E. E., 1987. Introduction to Reliability Engineering, John Wiley & Sons, Inc. N.Y.
- Munõz, A., 1997. Genetic Algorithms in Optimizing Surveillance and Maintenance of Components. Reliability Engineering & System 57(2).
- Safety Group (GSE), 1995. Failure Data Bank Report at Angra-I Nuclear Power Plant. Furnas Centrais Elétricas S. A.
- Shooman, M. L., 1990. Probabilistic Reliability Engineering Approach, Malabar: Krieger, R. E. (Publishing Co).

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO MAINTENANCE SCHEDULING OPTIMIZATION IN A NUCLEAR SYSTEM BASING ON RELIABILITY

Abstract. *This paper presents a solution based on genetic algorithm and probabilistic safety analysis that can be applied in the optimization of the preventive maintenance politic of nuclear power plant safety systems. The goal of this approach is to improve the average availability of the system through the optimization of the preventive maintenance scheduling politic. The auxiliary feed water system of a two loops pressurized water reactor is used as a sample case, in order to demonstrate the effectiveness of the proposed method. The results, when compared to those obtained by some standard maintenance politics, reveal quantitative gains at operational safety levels.*

Key words: *Maintenance Optimization, Genetic Algorithms, and Reliability*