

# MANUTENÇÃO OTIMIZADA DE EQUIPAMENTOS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

**Rainer Zanghi**

Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco E, sala 350 - CEP 24210-240, Niterói, RJ  
rzanghi@ic.uff.br

**Julio Cesar Stacchini de Souza**

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco E, sala 350 - CEP 24210-240, Niterói, RJ  
julio@ic.uff.br

**Milton Brown do Coutto Filho**

Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156 – Bloco E, sala 350 - CEP 24210-240, Niterói, RJ  
mbrown@ic.uff.br

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a aplicação de meta-heurísticas ao problema de otimização do agendamento de desligamentos em redes de energia elétrica, atendendo às restrições operacionais e limites funcionais dos equipamentos associados. Restrições de carregamento em ramos especiais são também consideradas. A metodologia proposta utiliza um algoritmo genético para a solução do problema de otimização formulado, sendo apresentados resultados de testes de validação da mesma.

**PALAVRAS CHAVE.** Otimização, Algoritmos Genéticos, Operação de Sistemas Elétricos.

**Área principal:** EN - PO na Área de Energia

## ABSTRACT

This work presents a methodology for the application of metaheuristics to solve the outages scheduling optimization problem in power systems networks, observing operational constraints and associated equipment functional limits. Load constraints on special branches are also considered. The proposed methodology uses a genetic algorithm for the solution of the formulated optimization problem. Test results are presented for validation purposes.

**KEYWORDS.** Optimization, Genetic Algorithms, Power Systems Operation.

**Main area** EN - PO na Área de Energia

## 1 Introdução

Para a manutenção de equipamentos de transmissão de energia elétrica em operação, se faz frequentemente necessário o desligamento das linhas de transmissão que energizam estes equipamentos. Em um sistema com operação unificada, onde diversos agentes são responsáveis pela manutenção dos equipamentos, cabe à operação efetuar a análise e o agendamento destes pedidos de desligamento.

Em sistemas interligados, como o Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, o desligamento de uma linha de transmissão, mesmo ocorrendo de forma programada, altera as condições operacionais dos demais equipamentos interligados. No caso de desligamentos simultâneos, os limites operacionais de alguns equipamentos podem ser violados de forma crítica, inviabilizando o agendamento destes pedidos em uma mesma janela de tempo. Além disso, durante o desligamento programado de certos equipamentos, deve também ser considerada a possibilidade de falha em outros equipamentos de transmissão que se encontram em operação. Esta análise de contingência pode indicar que violações nos limites operacionais dos equipamentos ocorrerão nestas situações, inviabilizando a programação de desligamentos proposta. Sob o ponto de vista do agente que requisita o desligamento, a prioridade dos pedidos de manutenção deve ser considerada, tendo em vista os diversos níveis de urgência possíveis para cada tipo de intervenção.

Para o analista de operação, responsável pela programação dos desligamentos em uma dada janela de tempo desejada, a busca de uma programação ótima que atenda a todos os requisitos descritos se constitui em um problema combinacional complexo, com inúmeras soluções possíveis. Tal característica torna atraente a aplicação de meta-heurísticas.

Diversas técnicas têm sido propostas na literatura para a programação de manutenção de equipamentos. Diferente do que ocorre neste trabalho, tais propostas estão em geral associadas à manutenção de unidades geradoras e são baseadas em diferentes técnicas de otimização, tais como: programação dinâmica (Zurn, 1976), programação inteira (Egan, 1976; Dopazo, 1989; Mukerji, 1991; Chen, 1991; Chattopadhyay, 1995), decomposição de Benders (Yellen, 1992; Al-Khamis, 1992; Silva, 1995), métodos heurísticos (Garver, 1972; Stremmel, 1981; El-Sheikhi, 1984; Contaxis, 1989; Juan, 1997), etc.

Em Roberto (2004) e Roberto (2005) o uso de algoritmos genéticos (AGs) se mostrou potencialmente interessante para a programação de desligamentos de equipamentos de transmissão. Porém, um AG muito simples foi empregado, sendo necessário maior investimento em seu aperfeiçoamento e a avaliação do efeito sobre a eficiência e eficácia da busca pela solução ótima. Além disso, é também de interesse a consideração de outras restrições importantes para o problema, conforme preconizado em ONS (2009). Este trabalho pretende dar continuidade ao realizado em Roberto (2004), introduzindo novas heurísticas e novas codificações que buscam tornar mais eficiente e eficaz a busca pela solução ótima. A consideração de novas restrições a serem atendidas também faz parte do escopo deste trabalho.

Na Seção 2 deste artigo, o problema do agendamento de desligamentos em redes de transmissão de energia elétrica é apresentado e formulado. Um breve sumário dos conceitos de Algoritmos Genéticos aplicados neste trabalho são introduzidos na Seção 3. Na Seção 4 todas as decisões metodológicas empregadas para a solução do problema de otimização apresentado são indicadas. Resultados de testes utilizando o sistema IEEE 14 são apresentados e discutidos na Seção 5. Comparações com resultados obtidos em Roberto (2004) são também realizadas nesta seção, demonstrando os benefícios da técnica proposta neste artigo. As conclusões do artigo são expostas na Seção 6 e a Seção 7 indica os agradecimentos.

## 2 Agendamento de Desligamentos

No Brasil, o planejamento de intervenções no SIN é de atribuição do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o qual recebe solicitações de desligamentos de equipamentos provenientes de diversas empresas. Atualmente, devido à ausência de ferramentas que tratem o problema de planejamento de intervenções de uma forma integrada, as estratégias usualmente empregadas são baseadas em análises simplificadas e na experiência sobre a operação

do sistema, o que em geral resulta no deslocamento dos desligamentos para períodos onde se acredita que seu impacto seja minimizado. Por exemplo, intervenções que levem a violações de quaisquer dos requisitos descritos nos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2009) são programadas de modo a incluir o maior número possível de horas nos períodos de carga leve e mínima, finais de semana ou feriados, de forma a minimizar a perda de carga e o tempo de exposição do sistema ao risco de uma operação inadequada. Tal estratégia, além de não considerar todas as análises necessárias para garantir o bom funcionamento do sistema, não busca atender a solicitação inicial de desligamentos.

De acordo com ONS (2009), uma solicitação de intervenção será aprovada quando atender certos requisitos, dentre os quais são considerados neste trabalho: não interrupção das cargas em regime normal de operação; o sistema deve suportar qualquer contingência simples, sem perda de carga; não devem existir violações de limites operativos definidos para regime normal em qualquer elemento na rede de operação;

Quando diferentes pedidos de intervenção se sobrepuserem em um mesmo período e não sendo eles compatíveis entre si, a prioridade será dada de acordo com os critérios relacionados em ONS (2009). Intervenções de urgência, que são aquelas em que se caracteriza risco aos equipamentos e/ou pessoas, são realizadas em qualquer período de carga devendo-se buscar realizá-las no período mais favorável para o sistema. As intervenções são consideradas não compatíveis quando a análise indicar que sua realização simultânea, em qualquer período de carga, leva a violação de qualquer dos critérios anteriormente descritos. Tal violação pode ser eliminada ou minimizada se as intervenções forem não coincidentes.

Na análise para obtenção da programação ótima, alguns insumos são necessários: os dados fornecidos pelos agentes que requisitam as intervenções (data inicial, duração desejada, linha a ser desligada e prioridade), a topologia do sistema e os perfis de carga de todas as barras do sistema

Na metodologia empregada neste trabalho, a programação de desligamentos ótima a ser buscada a partir dos insumos descritos anteriormente, deve atender aos requisitos anteriormente citados e estabelecidos em ONS (2009), além de apresentar o menor desvio possível em relação às solicitações apresentadas. Além disso, todos os desligamentos devem ocorrer em um horizonte de tempo de interesse para a operação. Neste trabalho serão também consideradas outras restrições comumente de interesse do planejador, as quais se referem à inclusão de inequações para limitação do carregamento em ramos adjacentes para casos especiais.

A programação ótima a ser obtida deve buscar minimizar as possíveis violações das restrições, considerando uma métrica que pondere cada restrição, de modo a mensurar a adequação do resultado final aos requisitos desejados.

Conforme Roberto (2004), o modelo adotado é fortemente influenciado pelas ponderações associadas às restrições, as quais propiciam também uma maior flexibilidade ao projetista para formular o problema e também incluir aspectos qualitativos e que levem também em consideração a experiência com o sistema.

### 3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) (Goldberg, 1989) são inspirados no paradigma epistemológico da Seleção Natural trazido por Charles Darwin e Alfred Russel Wallace. Na seleção natural, características hereditárias que contribuem para a aptidão do indivíduo ao meio se tornam mais comuns em uma população, pois estes indivíduos tem maior probabilidade de reproduzir e transferir seu material genético aos seus descendentes.

Os mecanismos da seleção natural, aplicados a algoritmos, permitem resolver problemas de otimização combinatória, onde as soluções ótimas desejadas correspondem aos indivíduos mais aptos. O material genético destes indivíduos é a codificação dos parâmetros que devem ser otimizados. Estes indivíduos são adaptados no processo evolutivo através de operadores genéticos, assim como ocorre na Seleção Natural. Os objetivos do problema e as restrições do meio, impostas aos indivíduos no mecanismo da seleção natural, são representadas em uma Função de Aptidão no AG.

A capacidade exploratória de um algoritmo de otimização é medida na diversificação da procura pela maior parte possível do espaço de soluções ou de busca. Para evitar convergência prematura ou intensificação na busca próxima a uma solução ótima local, o algoritmo deve manter sua capacidade de diversificação, conforme citado em Coello (2000). Os AGs mantêm em seu processo evolutivo uma população de indivíduos que representam possíveis soluções, possibilitando uma procura robusta do espaço de busca.

Dando continuidade ao trabalho realizado em Roberto (2004), o qual utilizou uma codificação binária simples, neste trabalho foram exploradas as codificações inteira e Gray. A codificação inteira é adequada quando a característica a ser otimizada pode ser representada por números inteiros. Na codificação Gray, as características são representadas por números binários no código Gray. Neste código, também chamado de código binário refletido, somente um bit muda de um número para o próximo na sequência. Para esta codificação, alterações de apenas um bit podem representar grandes alterações no valor final, permitindo uma maior exploração do espaço de soluções, conforme indicado em Rowe, et al. (2004).

Os tipos de operadores de cruzamento empregados para AGs dependem da codificação implementada. A utilização do operador SBX (Deb, 1994), se demonstrou robusta suficiente para ser utilizada no cruzamento de cromossomos de indivíduos com codificação inteira ou real. O operador binário de um ponto é usualmente utilizado para cruzamento de indivíduos com codificação em números binários.

O operador de mutação altera de maneira aleatória parte do material genético do indivíduo e permite que parte das características desejáveis perdidas durante o processo evolutivo seja recuperada.

Algumas estratégias ou heurísticas foram empregadas em AGs (Michalewicz, 1996; Coello, 2000; Blum and Roli, 2003; Haupt, 2004; Sivanandam, 2008). O elitismo é uma estratégia de seleção de um ou mais indivíduos, garantindo sua permanência em gerações futuras. A heurística de inclusão de certos indivíduos em uma população inicial bem diversificada também permite um melhor desempenho do AG.

Já foi explorada na literatura existente (Michalewicz, 1996; Haupt, 2004; Sivanandam, 2008) a utilização de AGs, com populações iniciais distintas, executados em paralelo e com possibilidade de migração de determinados indivíduos no final ou durante o processo evolutivo.

Os métodos de seleção escolhidos para as operações de cruzamento e mutação devem considerar aleatoriedade e aptidão. O método do torneio consiste na escolha aleatória de uma quantidade parametrizável de indivíduos onde somente o par mais apto é selecionado para cruzamento. O cruzamento e a mutação são processos aleatórios que ocorrem com probabilidade previamente especificada em parâmetros do AG. O processo de sintonia destes parâmetros é amplamente discutido na literatura (Michalewicz, 1996; Coello, 2000; Haupt, 2004; Sivanandam, 2008), sendo usual a aplicação de probabilidades de cruzamento altas e de mutação bem reduzidas.

Todos os cálculos que envolvem probabilidade em um AG devem ser feitos a partir de um gerador de números pseudo-aleatórios (GNPA) que possa garantir a randomicidade dos números e a reprodutibilidade dos valores gerados para uma mesma semente. O uso de séries com período longo e com randomicidade estatisticamente testada (Knuth, 1997) associadas a transformadas que permitem adequar os valores a uma distribuição normal (Box e Muller, 1958) se demonstrou eficiente para a geração de números pseudo-aleatórios em algoritmos que utilizam cálculos probabilísticos.

#### **4 Metodologia Proposta**

O problema de programação de desligamentos em redes de energia elétrica é formulado neste trabalho como um problema de otimização, no qual se busca a minimização de uma função que representa a reprogramação de um conjunto de desligamentos. É desejável, na medida do possível, manter as solicitações originadas de diferentes agentes. Para tal, as restrições básicas que devem ser observadas são: o atendimento a toda a demanda em regime normal de operação e na ocorrência de contingências, a não ocorrência de violação dos limites operativos em condição

normal e em contingência e restrições específicas de carregamento em alguns ramos especiais. Além disso, devem também ser levadas em consideração as prioridades das intervenções.

Intervenções que levem a qualquer violação nas restrições anteriormente descritas deverão ser reprogramadas, com o mínimo de desvio possível em relação à solicitação original, para períodos onde as mesmas sejam eliminadas ou reduzidas. Quando diferentes pedidos de intervenções se sobrepuserem em um mesmo período, não sendo compatíveis entre si, deve-se levar em consideração a prioridade de cada uma. Logo, o problema pode ser formulado como:

$Min (R_{int})$   
*s/a atendimento à demanda;*  
*inviolabilidade de limites operativos;*  
*suportabilidade a contingências simples;*  
*observação às prioridades das intervenções;*  
*atendimento a restrições de carregamento*

onde  $R_{int}$  representa a reprogramação dos desligamentos.

#### 4.1 Codificação

Dado que o tempo de duração dos desligamentos é fixo e determinado pelos agentes (bem como os ramos que serão desligados), na programação a ser otimizada figurarão apenas os horários iniciais de cada desligamento em uma janela de tempo pré-definida.

Neste trabalho foram exploradas as potencialidades das codificações inteira e binária no sistema numérico Gray. Na codificação inteira, cada variável (hora inicial do desligamento) é representada por um número inteiro. Na codificação Gray, todas as variáveis são convertidas em uma cadeia de números binários. Esta cadeia é então convertida em um número binário em código Gray equivalente para cada variável.

A janela de tempo na qual os desligamentos podem ser agendados é determinada pela máxima representatividade possível na codificação escolhida. Caso o número de bits da codificação Gray seja igual a 6 (seis) é possível apenas valores entre 0 e 63 que correspondem a 0:00 do primeiro dia às 15:00 do terceiro dia da janela de tempo. No caso da codificação inteira a máxima representatividade também é definida em limites rígidos fora dos quais o AG não poderá explorar. O tamanho ideal deste intervalo não é conhecido *a priori*, mas deve ser tal que permita uma programação de desligamentos que atenda os objetivos definidos no problema de otimização anteriormente apresentado.

#### 4.2 Condições de carregamento

Com base nos horários iniciais dos desligamentos e suas correspondentes durações é possível compor todos os cenários de operação, a cada hora da janela de tempo de análise. Estes cenários indicarão, a cada hora, quais ramos do sistema estarão desligados, assim como a condição de carregamento e topologia presente. A avaliação da condição de operação do sistema para cada cenário permitirá avaliar a adequação da programação de desligamentos proposta. Neste trabalho, para fins de análise de desempenho do sistema, foram considerados os seguintes níveis de carregamento em função da hora do dia:

- Entre 0:00h e 8:00h – nível de carga leve
- Entre 8:00h e 18:00h – nível de carga média
- Entre 18:00h e 24:00h – nível de carga pesada

#### 4.3 Formulação da Função Aptidão

A função aptidão é a métrica utilizada pelo AG para guiar o processo evolutivo de acordo com os objetivos propostos. Esta função contém fatores que penalizarão a aptidão de uma determinada programação ou indivíduo, em função do não atendimento aos objetivos e restrições do problema.

##### 4.3.1 Atendimento às prioridades

A cada desligamento é associada uma prioridade que irá ponderar os desvios de cada programação com relação à programação inicial, proposta pelos agentes que requisitaram os

desligamentos.

A penalização aplicada ao não atendimento à programação inicial e suas prioridades pode ser representada através da expressão (1).

$$R_{\text{int}} = \left[ \sum_{i=1}^n \Delta h(i) \times P_{\text{pri}}(i) \right] \times P_{\text{dsv}} \quad (1)$$

onde  $\Delta h(i)$  é o desvio, em horas, do  $i$ -ésimo desligamento de uma dada programação em relação ao correspondente horário na programação inicial,  $P_{\text{pri}}(i)$  é a prioridade associada ao  $i$ -ésimo desligamento e  $P_{\text{dsv}}$  a penalidade aplicada ao desvio na programação. O valor de  $n$  representa o número de desligamentos considerados na programação.

#### 4.3.2 Atendimento à Demanda

Para cada indivíduo do AG, este requisito é avaliado com a execução de um programa de fluxo de potência para cada hora do dia onde ao menos um desligamento é considerado. Caso seja detectado o não atendimento à carga (através da não convergência do fluxo de potência), um incremento correspondente a uma penalidade é imposto à função de aptidão. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$\text{Min}[R_{\text{int}} + (P_{\text{dem}} \times \sum_{t=1}^{na} k_t)] \quad (2)$$

onde  $P_{\text{dem}}$  é a penalidade imposta pelo não atendimento à carga, sendo  $k_t=1$  quando a carga não é atendida durante a análise do  $t$ -ésimo cenário e  $k_t=0$  quando a carga é atendida em tal cenário,  $na$  representa o número de cenários analisados. Nota-se de (2) que, considerando o objetivo de minimizar  $R_{\text{int}}$  (reprogramação de desligamentos) o acréscimo da parcela correspondente a penalização pelo não atendimento a demanda pode fazer com que maiores afastamentos da programação original sejam admitidos para que o atendimento a demanda seja sempre respeitado.

O número de cenários  $na$  a analisar é dependente da programação de desligamentos representada pelo indivíduo do AG, considerando o período de cada desligamento, sua condição de carregamento e simultaneidade com demais desligamentos.

#### 4.3.3 Atendimento aos Limites Operativos

Este requisito é avaliado com a execução de um programa de fluxo de potência para cada cenário da programação e, caso seja detectado o não atendimento aos limites operativos dos equipamentos, um incremento correspondente a uma penalidade é imposto à função de aptidão. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Min}[R_{\text{int}} + (P_{\text{dem}} \times \sum_{t=1}^{na} k_t) + (P_v \times \sum_{i=1}^{nv} \text{Viol}_v)_i] \\ + (P_n \times \sum_{j=1}^{nFn} \text{ViolFn}_j) + (P_e \times \sum_{k=1}^{nFe} \text{ViolFe}_k)] \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

$P_v$  é a penalidade imposta quando ocorrem violações de tensão na programação analisada,  $P_n$  é a penalidade imposta quando ocorrem violações de limites de fluxo nominal,  $P_e$  é a penalidade imposta quando ocorrem violações de limites de fluxo de emergência,  $\text{Viol}_v$  é a magnitude da  $i$ -ésima violação de tensão observada,  $\text{ViolFn}_j$  é a magnitude da  $j$ -ésima violação de limite de fluxo nominal observada,  $\text{ViolFe}_k$  é a magnitude da  $k$ -ésima violação de limite de fluxo de emergência observada,  $nv$  é o número total de violações de tensão observadas na programação,  $nFn$  é o número total de violações de limites de fluxo nominal observadas na programação,  $nFe$  é o número total de violações de limites de fluxo de emergência observadas.

Para as violações dos fluxos de potência, existem dois limites superiores sendo observados: o limite nominal e o limite de emergência, este segundo de valor maior, porém devendo ser de curta duração. Para garantir uma maior severidade da violação do limite de emergência foram atribuídos valores das penalidades onde  $P_e > P_n$ .

Nas violações de tensão são analisados limites inferiores e superiores das tensões nas barras.

#### 4.3.4 Atendimento a Contingências Simples

Para cada cenário da programação, este requisito é avaliado durante a análise de um conjunto de contingências e, caso seja detectado o não atendimento a carga ou o não atendimento aos limites operativos dos equipamentos, um incremento correspondente a uma penalidade é imposto à função de aptidão. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Min} & \left\{ R_{\text{int}} + \left( P_{\text{dem}} \times \sum_{i=1}^{na} k_i \right) + \left( P_v \times \sum_{i=1}^{nv} \text{Viol}V_i \right) \right. \\ & \left. + \left( P_n \times \sum_{j=1}^{nFn} \text{Viol}Fn_j \right) + \left( P_e \times \sum_{k=1}^{nFe} \text{Viol}Fe_k \right) \right\} \\ & + \sum_{l=1}^{nctg} \left[ \left( P_{\text{dem}}^{(l)} \times \sum_{i=1}^{na^{(l)}} k_i^{(l)} \right) + \left( P_v^{(l)} \times \sum_{i=1}^{nv^{(l)}} \text{Viol}V_i^{(l)} \right) + \left( P_e^{(l)} \times \sum_{k=1}^{nFe^{(l)}} \text{Viol}Fe_k^{(l)} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Onde  $nctg$  é o número de contingências a analisar. Pode-se observar que, neste caso, o atendimento a demanda e aos limites operativos também deve ser verificado para os cenários da rede em contingência, podendo-se definir diferentes penalidades para cada contingência considerada. A principal diferença neste caso é que são observados apenas os limites de emergência, não sendo observados os limites nominais de fluxo dos equipamentos, pois já se configura uma situação de emergência na rede elétrica.

#### 4.3.5 Atendimento às Inequações de Sobrecarga em Ramos Especiais

Na análise de certos arranjos topológicos especiais se faz necessário verificar a influência que o desligamento de uma linha de transmissão tem sobre o carregamento de outros equipamentos. Dessa forma, através da execução *a priori* do Fluxo de Potência onde somente a linha cujo carregamento se deseja analisar é retirada do sistema, calcula-se um fator de superposição desta linha sobre cada uma das demais linhas do arranjo. Este fator  $k$  representa percentualmente a quantidade do carregamento da linha removida que será transferida às demais linhas do arranjo após a remoção.

Para cada cenário de programação onde estas duas linhas não estão programadas para desligamento, é verificada a inequação:

$$F_1 + (k_{12} \times F_2) > F_{1_{\text{emerg}}} \quad (5)$$

Onde  $F_1$  representa o fluxo de potência ativa da linha que poderá ser sobrecarregada,  $F_2$  representa o fluxo da potência ativa daquela que será desligada,  $F_{1_{\text{emerg}}}$  é o limite de emergência para o fluxo de potência ativa da linha cuja sobrecarga está sendo avaliada e  $k_{12}$  representa o fator de superposição do carregamento da linha 2 sobre a linha 1.

Caso a inequação seja violada, uma penalização será adicionada à aptidão daquela programação, proporcional à diferença entre o limite de emergência e o novo fluxo da linha em sobrecarga. Esta penalidade será incluída também nos casos das contingências consideradas. É importante ressaltar que restrições deste tipo são usualmente observadas pelo ONS em suas análises, sendo formuladas com base na experiência e conhecimento sobre o sistema a ser analisado. Na metodologia proposta, a inclusão de tais restrições permite, portanto, representar o conhecimento e experiência dos especialistas da operação do sistema.

#### 4.4 Processo Evolutivo

Cada programação, definida pelo conjunto de horários iniciais de cada desligamento constitui o indivíduo que será otimizado pelo AG em seu processo evolutivo. Para cada programação, um grupo de cenários de diferentes níveis de carregamento deverá ser avaliado para a obtenção de um valor de aptidão. Este cálculo é feito para cada indivíduo de cada população. Com o valor de aptidão calculado, o AG executa seus operadores de seleção, cruzamento e mutação na população atual para gerar uma nova população. Neste trabalho foi

introduzido o conceito de se inserir o melhor indivíduo das últimas  $g$  gerações em uma nova população gerada aleatoriamente sempre com uma semente distinta no gerador de números pseudo aleatórios (GNPA), como pode ser visto no fluxograma descrito na Figura 1.

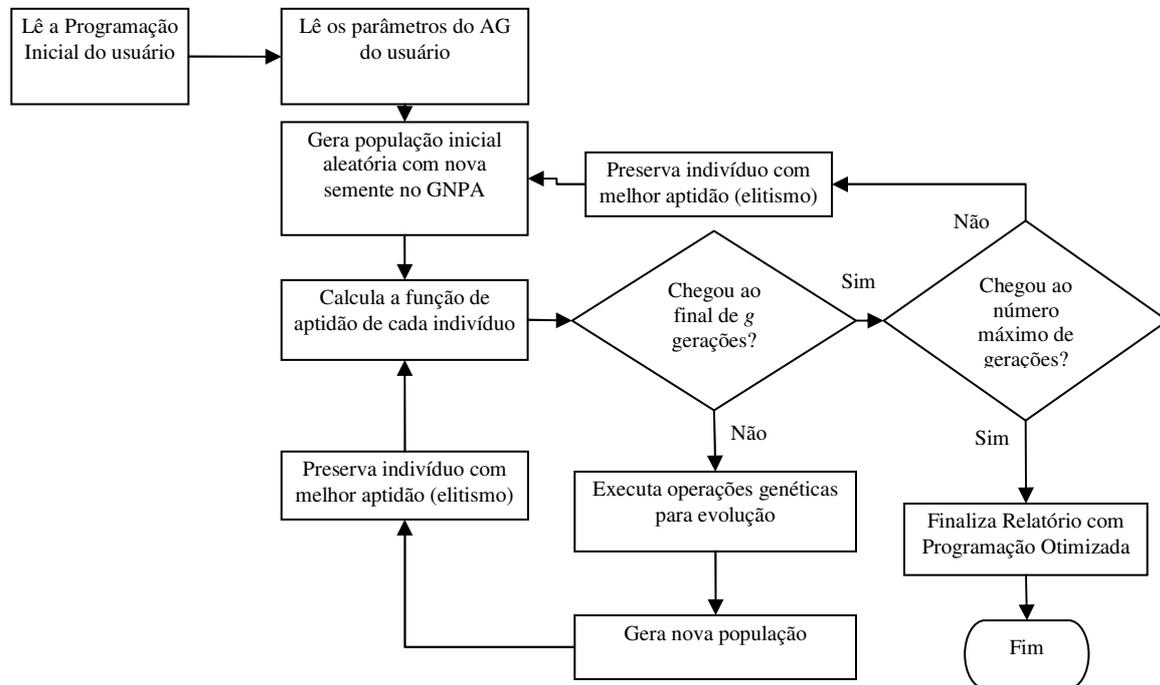


Figura 1. Fluxograma do Processo Evolutivo da Metodologia Proposta

## 5 Testes e Resultados

Diversas simulações foram realizadas visando testar a metodologia proposta. Para tal, foram utilizados os sistemas teste IEEE 14 barras e IEEE 30 barras (Christie, 1999). Os testes com o sistema IEEE 14 barras foram realizados de forma a permitir uma análise comparativa entre os resultados obtidos com a metodologia proposta e aqueles relatados em Roberto (2004). Foi adotado o elitismo entre gerações e, conforme mencionado na Seção 4.4, foi também implementada uma estratégia de popular novamente o AG, após um número definido de gerações, com indivíduos gerados aleatoriamente, mantendo apenas o indivíduo mais apto encontrado até então.

### 5.1 Descrição da Simulação

Nos testes com o sistema IEEE 14 barras, visando à comparação de resultados, foram feitas simulações utilizando a mesma programação inicial de desligamentos empregada em Roberto (2004). Para o sistema IEEE 30 barras foram feitos testes que avaliaram o desempenho do AG para programações com 5, 6, 7, 8, 9 e 10 desligamentos. Para ambos os sistemas considerou-se que os desligamentos deveriam acontecer em uma janela de tempo de 31 horas.

Foram utilizados os mesmos valores para penalizações de restrições utilizadas em Roberto (2004) e para a nova restrição das inequações de monitoramento de sobrecarga introduzida, foi adotada uma penalidade igual a 70, a qual apresentou bons resultados nas simulações realizadas. Em todos os testes foi empregada uma parametrização básica do AG com população de 100 indivíduos, probabilidade de cruzamento de 90% e de mutação de 2%, seleção por torneio com 3 indivíduos, operador de cruzamento SBX para codificação inteira e binário de um ponto para codificação Gray. Foi adotado um critério de parada de 1600 gerações.

### 5.2 Testes com o Sistema IEEE 14 barras

Os resultados apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 a seguir ilustram o desempenho do AG para diferentes situações, sendo sempre apresentado o valor da função de aptidão da melhor

programação em cada geração. A Figura 2 ilustra a característica de convergência da programação com 5 desligamentos, com prioridade de urgência no desligamento do ramo 2-5 e atendendo às restrições operativas considerando inequações para anéis 2-3-4 (desligando 2-4) e 6-12-13 (desligando 6-12) e utilizando codificação Gray.

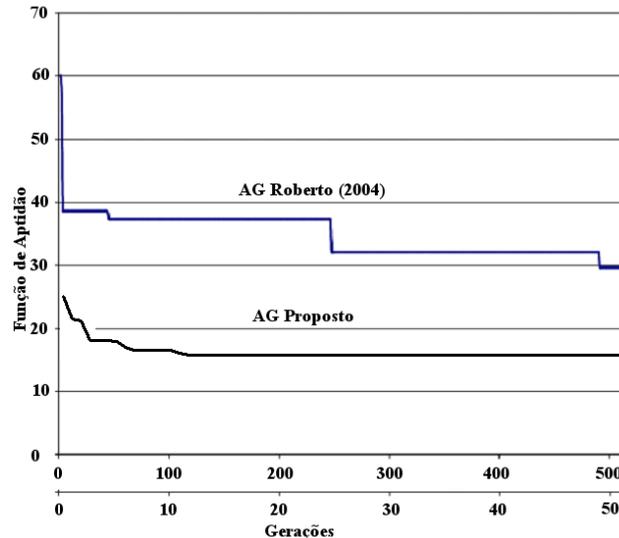


Figura 2. Função de Aptidão x Gerações Teste 1

A Figura 3 ilustra a característica de convergência da programação com 5 desligamentos, com prioridade de urgência no desligamento do ramo 4-7 e atendendo às restrições operativas considerando inequações para anéis 2-3-4 (desligando 2-4) e 6-12-13 (desligando 6-12) e utilizando codificação Gray. A Figura 4 ilustra a característica de convergência da programação com 5 desligamentos, com prioridade de urgência no desligamento do ramo 12-13, prioridade 3 no desligamento do ramo 2-4 e atendendo às restrições operativas considerando inequações para anéis 2-3-4 (desligando 2-4) e 6-12-13 (desligando 6-12) e utilizando codificação Gray.

Em todos os testes realizados é possível perceber que a metodologia proposta é capaz de obter melhores valores de aptidão em menos gerações e, conseqüentemente, com menor esforço computacional. É importante notar o uso de dois eixos distintos, um para cada traço, nos gráficos ilustrados nas Figuras 2 a 4. Como exemplo, na Figura 2, vemos que o AG proposto convergiu em 20 Gerações enquanto o AG de Roberto (2004) convergiu em 500 gerações.

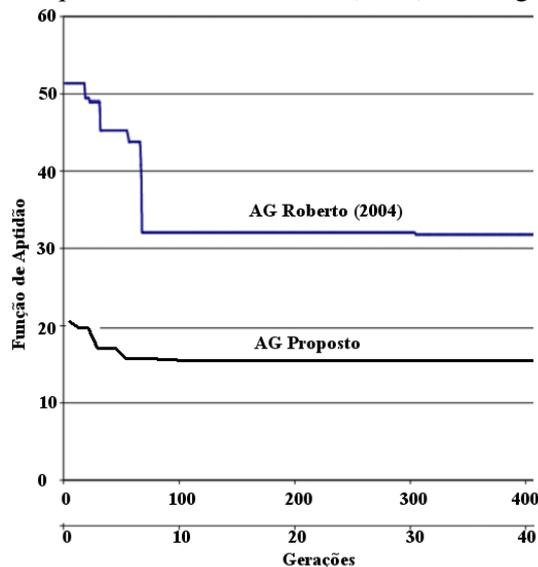


Figura 3. Função de Aptidão x Gerações Teste 2

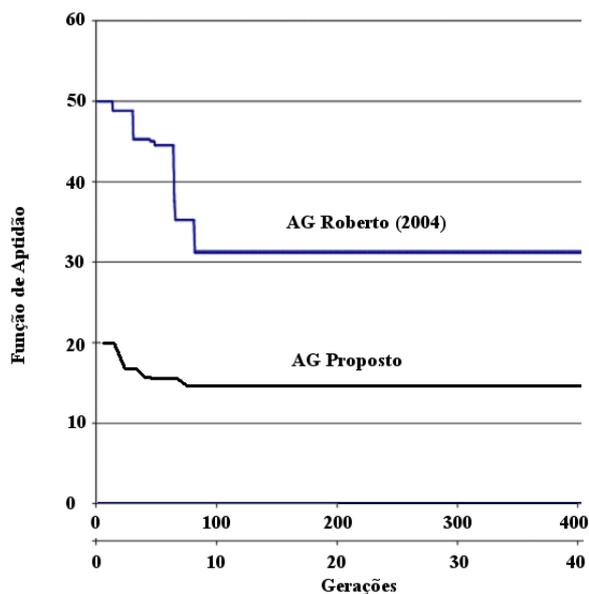


Figura 4. Função de Aptidão x Gerações Teste 3

O emprego da codificação inteira não mostrou desempenho superior ao obtido com o AG de Roberto (2004) e por esta razão seus resultados não foram apresentados. Foram também realizadas simulações com múltiplas partidas em paralelo do mesmo AG, tanto utilizando a codificação GRAY como a codificação Inteira, não tendo sido encontrados melhores resultados que os obtidos com a estratégia de repopulação proposta.

### 5.3 Testes com o Sistema IEEE 30 barras

Para o Sistema IEEE 30 barras foram testados casos de 5 a 10 desligamentos com todas as restrições, considerando inequações de sobrecarga para os anéis 1-2-3-4 e 12-14-15, um ramo com prioridade de emergência, três ramos em contingência e atendendo aos limites operativos. Foi utilizada codificação Gray, estratégia de elitismo a cada geração e a cada 40 gerações uma nova população era gerada. A Tabela 1 apresenta os resultados para cada caso simulado.

Tabela 1. Número de Gerações, Aptidão e Desvio dos testes no IEEE 30 barras.

Número de Desligamentos	Gerações até convergência	Aptidão da Programação Inicial	Aptidão da Programação Ótima	Desvio médio (h)
5	23	114,91	7,27	4,00
6	38	117,08	8,01	4,33
7	32	126,51	7,53	3,86
8	40	127,79	8,01	4,88
9	149	130,81	7,74	3,78
10	750	136,87	7,23	4,10

Na Tabela 2 a seguir é possível verificar a programação otimizada obtida quando se considerou 10 desligamentos, assim como o seu desvio individual e médio com relação à programação original. Pode-se notar que a programação do desligamento do ramo 1, que possui prioridade de emergência, apresentou desvio igual a zero.

É importante destacar que a metodologia proposta permite uma forma sistemática de tratar o problema da programação de desligamentos em redes de transmissão, focado como um problema de otimização. Os resultados mostram ser possível obter desvios considerados pequenos em relação aos horários inicialmente solicitados. Convém ressaltar que, segundo o ONS, com o procedimento simplificado e não sistemático atualmente adotado, tais desvios muito frequentemente excedem 24 horas.

Tabela 2. Desvio da Programação Original para teste de 10 desligamentos no IEEE 30 barras.

Ramo	Horário Inicial Prog. Original	Horário Inicial Prog. Otimizada	Desvio Individual (h)
1	8:00	8:00	0
2	10:00	8:00	-2
3	14:00	0:00	-14
4	18:00	0:00 (dia seguinte)	6
5	15:00	13:00	-2
6	8:00	1:00	-7
7	10:00	10:00	0
8	14:00	12:00	-2
9	18:00	13:00	-5
10	15:00	12:00	-3
<b>Desvio Médio (h)</b>			<b>4,10</b>

## 6 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para a programação ótima de desligamentos em redes de transmissão de energia elétrica. Tal metodologia se baseia no emprego de um AG, tendo sido testadas diferentes formas de codificação da solução. Além disso, foi empregada uma estratégia de repopular o AG após certo número de gerações, com elitismo, o que gerou uma maior exploração do espaço de soluções, permitindo que o algoritmo encontrasse soluções ainda melhores. Com o emprego da codificação Gray foi possível obter bons resultados, uma vez que tornou possível gerar uma boa diversificação maior dos indivíduos, impedindo uma convergência prematura, e explorar melhor o espaço de soluções. As programações obtidas apresentaram pequenos desvios em relação às solicitações originais, sendo atendidas todas as restrições, inclusive as inequações de sobrecarga em ramos especiais. Os operadores utilizados, a codificação adotada e a estratégia de elitismo entre gerações permitiram encontrar soluções de maior qualidade e de menor custo computacional, como demonstrado nos resultados comparativos apresentados. A aplicação de outras meta-heurísticas ao problema abordado neste trabalho será alvo de investigação futura.

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem a cooperação e o apoio do Engenheiro Marcio Leonardo Ramos Roberto, do ONS, na elaboração deste trabalho.

## Referências

- Al-Khamis, T.M.; Vemuri, S.; Lemonidis, L. and Yellen, J.** (1992). Unit Maintenance Scheduling with Fuel Constraints. *IEEE Trans. on PWRs*, Vol.7, No.2, pp. 933-939.
- Blum, C. and Roli, A.** (2003), Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, Vol. 35, Issue 3 (September 2003), 268-308.
- Box, G.E.P. and Muller, M.E.** (1958), A Note on the Generation of Random Normal Deviates, *The Annals of Mathematical Statistics (1958)*, Vol. 29, No. 2 pp. 610-611
- Chattopadhyay, D.; Bhattacharya, K. and Parikh, J.** (1995). A Systems Approach to Least-Cost Maintenance Scheduling for an Interconnected Power System. *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, 4, pp.2002-2007.
- Chen, L. and Toyoda, J.** (1991). Optimal Generating Unit Maintenance Scheduling for Multi-Area System with Network Constraints. *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 6, pp.1168-1174.
- Christie, R.D.** (1999), Power Systems Test Case Archive [online], Disponível em: <<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>> [acessado em 28/04/2011]
- Coello, C.A.** (2000). An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys*, Vol. 32, Issue 2 (June 2000), pp.109-143.

**Contaxis, G.C.; Kavatza, S.D. and Vournas, C.D.** (1989). An Interactive Package for Risk Evaluation and Maintenance Scheduling. *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 4, 2, pp.389-395.

**Deb, K. and Agrawal R.B.**, (1994) Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space. *Complex Systems*, Vol. 9 (1994), pp. 1-34..

**Dopazo, J.F. and Merrill, H.M.** (1989). Optimal Generator Maintenance Scheduling using Integer Programming. *IEEE Trans. on PA Syst.*, vol. 4, 2, pp.389-395.

**Egan, G.T.; Dillon, T.S. and Morsztyn, K.** (1976). An Experimental Method of Determination of Optimal Maintenance Schedules in Power Systems Using the Branch and Bound Technique. *IEEE Trans. Man & Cybs*, Vol. SMC-6, No. 8, 1269-1278.

**El-Sheikhi, F.A. and Billinton, R.** (1984). Generating Unit Maintenance Scheduling for Single and Two Interconnected Systems. *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-103, 5, pp. 1038-1044.

**Garver, L.L.** (1972). Adjusting Maintenance Schedules to Levelize Risk. *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-91, pp. 2057-2063.

**Goldberg, D.E.** (1989). Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, *Reading, Massachusetts: Addison-Wesley*.

**Haupt, R.L. and Haupt, S.E.** (2004) Practical Genetic Algorithms, 2nd ed, *New York: Wiley*.

**Juan, J. and Ortega, I.** (1997). Reliability Analysis for Hydrothermal Generating Systems Including the Effect of Maintenance Scheduling. *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 12, 4, pp.1561-1568.

**Knuth, D.E.** (1997), The Art of Computer Programming, Vol 2, Seminumerical Algorithms, Third Edition, *Reading, Massachusetts: Addison-Wesley*, ISBN 0-201-89684-2.

**Michalewicz, Z.** (1996), Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs, Third Edition, *New York: Springer*, ISBN 3-540-60676-9.

**Mukerji, R.; Merrill, H.M.; Erickson, R.; Parker, J.H. and Freidman, R.E.** (1991). Power Plant Maintenance Scheduling: Optimizing Economics and Reliability. *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 6, 2, pp. 476-483.

**ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).** (2009) Procedimentos de Rede, Submódulo 6.5, "Programação de Intervenções em Instalações da Rede de Operação", *Rio de Janeiro: ONS*.

**Roberto, M.L.R.** (2004) Programação Ótima de Desligamentos em Redes de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos., Dissertação de Mestrado, *Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense*, [pdf]. Disponível em: <http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/Dissertacoes/481.pdf>

**Roberto, M L R ; Souza, J. C. S. ; Do Coutto Filho, M.B. ; Schilling, M T** (2005). Planejamento de Intervenções em Redes de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos Genéticos. In: VII Simposio Brasileiro de Automação Inteligente, 2005, São Luis. Anais do VII SBAI, 2005. v. 1. p. 1-6.

**Rowe, J., Whitley, D., Barbulescu, L., and Watson, J.P.** (2004). Properties of Gray and Binary Representations. *Evolutionary Computation*, Vol. 12, Issue 1 (March 2004), 47-76.

**Sivanandam, S.N., Deepa, S.N.** (2008) Introduction to Genetic Algorithms, *New York: Springer*, ISBN 9783540731894

**Silva, E.L.; Morozowski, M.; Fonseca, L.G.S.; Oliveira, G.C.; Melo; A.C.G. and Mello, J.C.O.** (1995). Transmission Constrained Maintenance Scheduling of Generating Units: A Stochastic Programming Approach. *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 10, 2, pp. 695-701.

**Stremmel, J.P.** (1981). Maintenance Scheduling for Generation System Planning. *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-100, 3, pp. 1410-1419 1981.

**Yellen, J.; Al-Khamis, T.M.; Vemuri, S. and Lemonidis, L.** (1992). A Decomposition Approach to Unit Maintenance Scheduling. *IEEE Trans. on PWRS*, vol. 7, 2, pp. 726-733.

**Zurn, H.H. and Quintana, V.H.** (1976). Several Objectives Criteria for Optimal Generator Preventive Maintenance Scheduling. *IEEE Trans. on PWRS*, vol. 96, 3, pp. 984-992.