



XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CB/GMI/05

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -GMI

GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE TRANSMISSÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

José Evangelista Araujo Neto(*)
FURNAS

Carlos Aberto de Castro Junior
UNICAMP

RESUMO

Este trabalho propõe uma abordagem para enfrentar o problema da programação manutenção dos equipamentos de transmissão baseada na relação confiabilidade/custo com a perspectiva de encontrar as melhores estratégias para a realização de manutenções em equipamentos (ativos) de transmissão de energia elétrica, apresentando um modelo matemático para a confecção de um calendário viável (que respeite as restrições do Sistema Elétrico) para programação de manutenção e metodologia de otimização para encontrar as melhores soluções em um determinado horizonte de planejamento.

PALAVRAS-CHAVE

Programação, Manutenção, Transmissão, Confiabilidade, Heurísticas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma empresa de energia elétrica tem por objetivo garantir a continuidade e a qualidade do serviço prestado. A fim de incentivar a qualidade do serviço, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) introduziu penalidades nos contratos com as concessionárias de serviços públicos de transmissão de energia elétrica caso as instalações de transmissão sejam desligadas, por acidente, falha de equipamento ou manutenção programada. Abordagens tradicionais de manutenção em sistemas de transmissão de energia elétrica se baseiam em ações realizadas periodicamente, ou programadas, de acordo com uma análise de necessidades. Embora essas abordagens tenham o objetivo de melhorar o desempenho destes sistemas, geralmente não há uma avaliação precisa do impacto das ações de manutenção na confiabilidade dos mesmos, relacionada aos recursos empregados, bem como penalidades legais decorrentes.

O objeto assim formulado caracteriza-se como um problema de otimização combinatória com o objetivo de encontrar o encadeamento das ações de manutenções que minimizem os recursos utilizados em manutenções e garanta um nível de confiabilidade desejado para o Sistema Elétrico. Este artigo propõe uma abordagem para enfrentar este problema baseada na relação confiabilidade/custo com a perspectiva de encontrar as melhores estratégias para a realização de manutenções em equipamentos (ativos) de transmissão de energia elétrica, apresentando um modelo matemático para a confecção de um calendário viável (que respeite as restrições do Sistema Elétrico) para programação de manutenção nestes ativos e metodologia de otimização para encontrar as melhores soluções em um determinado horizonte de planejamento.

2.0 - O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Segundo (14), um processo adequado de solução de um problema requer, antes de tudo, o reconhecimento do seu grau de complexidade. Por outro lado, a complexidade de um problema pode ser observada nos diversos aspectos que o cercam, tais como as suas várias dimensões (técnica, econômica, financeira, social etc), os interesses das

(*) Avenida de Ivan Azevedo (caminho 333) – CTRS.O – CEP 13.098-505 Campinas, SP, – Brasil
Tel: (+55 19) 3031-7233 – Fax: (+55 19)3031-7291 – Email: jeneto@furnas.com.br

partes envolvidas no processo de decisão, nas incertezas presentes no problema e na urgência da obtenção da solução. No caso em estudo, o problema proposto pode ser definido como o relacionado com a programação da manutenção vivenciado por um sistema que possua um conjunto de equipamentos, sujeito a restrições elétricas, sazonais, legais, de segurança, logísticas etc. Desta forma, a solução será encontrar uma sequência de calendário viável de retirada de equipamentos para manutenção, de modo compatível com a utilização dos recursos disponíveis e de acordo com as demais características e restrições impostas.

Entretanto, planejar o momento mais propício para realizar a intervenção de manutenção é uma tarefa complexa que dificulta a implantação de avaliações sistematizadas que possam orientar ações estratégicas visando à otimização dos resultados para o conjunto das empresas do setor elétrico. As concessionárias têm que lidar com aspectos relacionados à indústria da energia elétrica, onde a indisponibilidade de equipamentos e até mesmo de sistemas auxiliares são decisões de peso e que podem impactar fortemente seus resultados. Em alguns casos a questão é particularmente difícil. A solução envolve várias características do problema, sendo que cada uma pode ser interpretada como sendo uma função objetivo a ser satisfeita. Espera-se que a mesma contemple: maximizar a utilização da capacidade logística das diversas equipes de manutenção; maximizar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos para o Sistema Elétrico; minimizar as perdas e custos financeiros decorrentes dos processos de manutenção. A solução, também, está condicionada às restrições de ordem sistêmica determinadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Além disso, ao tornar o processo de definição da programação mais direto e transparente, outras características específicas poderão ser alcançadas. Quanto à complexidade, encontrar soluções para o problema de programação de manutenção é, no mínimo, exponencial na medida em que cada intervalo de programação apresenta ao menos 2^{mn} possíveis soluções (onde m é número de períodos de tempo do calendário de programação e n é o número de equipamentos). Além disso, o problema apresenta semelhanças com problemas do tipo NP-Completo, ou seja, não foi provado que existam algoritmos com tempo de execução limitada por uma função polinomial (de ordem do número de variáveis) que solucione este problema.

Por outro lado, grandes empresas com unidades (estações) territorialmente dispersas dependem ainda mais da eficiência das boas práticas de programação, uma vez que sua principal vantagem competitiva, a integração, por vezes pode não se consubstanciar em planos de manutenção que são capazes de maximizar os resultados corporativos. Nestas empresas, a interação existente entre as atividades de manutenção, operação e logística permite maior flexibilidade e amplia as possibilidades de ganhos advindos da integração, porém exige que a mesma se dê de forma bastante articulada e sincronizada. Ações associadas a planos de contingência devem ser implementadas para solucionar ou amenizar os problemas verificados e, para tal, deverão estar disponíveis alternativas para fontes de suprimento e recursos logísticos, previamente definidos durante a fase de planejamento. Logo, fica evidente a necessidade de desenvolvimento de ferramentas para gerenciamento integrado da elaboração de cronogramas de programação de manutenção dos ativos de transmissão de sistemas elétricos de potência.

3.0 - MARCO REGULATÓRIO

A partir de 03 de junho de 2008, entra em vigor a resolução da ANEEL 270/2007 e a rotina operacional do ONS RO-AO.BR.05 que têm como objetivo a apuração dos desligamentos, restrições operativas temporárias, cancelamentos e períodos de utilização de equipamentos reservas remunerados em instalações de transmissão. A partir desta data todos os equipamentos de tensão maior ou igual 230 kV pertencentes às empresas do setor elétrico (com poucas exceções) passaram a gerar receitas dependendo de sua disponibilidade. Neste contexto, as áreas de manutenção das concessionárias de energia elétrica passaram a ter um lugar de destaque, sendo cada vez mais exigidas a responder aos desafios que se apresentam com relação à melhoria da relação custo/benefício das atividades de manutenção. Assim, os dois grandes desafios atuais das áreas de manutenção em ordem de prioridade são garantir a qualidade de energia elétrica, através da confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, e minimizar os custos de manutenção. Portanto, a boa gestão dos ativos de transmissão e da atuação da manutenção sob os mesmos se tornou um tema de grande relevância no cotidiano das empresas. Neste trabalho ir-se-á considerar que os ativos de transmissão são as linhas de transmissão, transformadores, banco de capacitores, compensadores síncronos, reatores etc.

4.0 - O MODELO PARA PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

Segundo (1), a elaboração de modelos matemáticos que representem mais fielmente o funcionamento dos equipamentos elétricos e os procedimentos de manutenção adotados nas empresas, é um dos grandes desafios para engenheiros e pesquisadores. Saliencia-se que estes modelos permitirão definir com maior precisão e segurança a periodicidade de manutenção nestes equipamentos. Para (2), um departamento de Engenharia de uma empresa deve estar apto para decidir a frequência de inspeção, o tempo de reparo, e a necessidade da execução de uma substituição, revisão ou mínimos reparos dos equipamentos. Para responder estas questões são elaborados modelos de manutenção com o propósito de: maximizar lucros, minimizar tempos destinados a reparos e maximizar a disponibilidade do sistema de transmissão. A estratégia de modelagem aplicada neste trabalho consiste de duas partes: minimizar custos de manutenção e o risco de falha (baseado em (3)); confecção do calendário viável com otimização logística (baseado em (4)).

"Uma técnica extremamente importante aplicada a sistemas reparáveis e não-reparáveis são os processos de Markov, bastante utilizados em estudos de confiabilidade de sistemas elétricos para representar a operação de um ou mais equipamentos" (5). Os processos estocásticos de Markov denominam as diferentes condições ou possibilidades dos equipamentos como estados, sendo que, para cada estado associa-se uma probabilidade de que o equipamento esteja naquele estado. De acordo com (6), os componentes de um sistema de potência podem ser adequadamente representados por um modelo a dois estados (em operação ou fora de operação). A inclusão de estados intermediários de operação considerados é facilmente feita através desta técnica, portanto, estes modelos podem ser utilizados para representar, por exemplo, o processo de deterioração de equipamentos, manutenções preventivas, falhas aleatórias etc. Com efeito, a FIGURA 1 ilustra o diagrama do modelo markoviano desenvolvido neste trabalho:

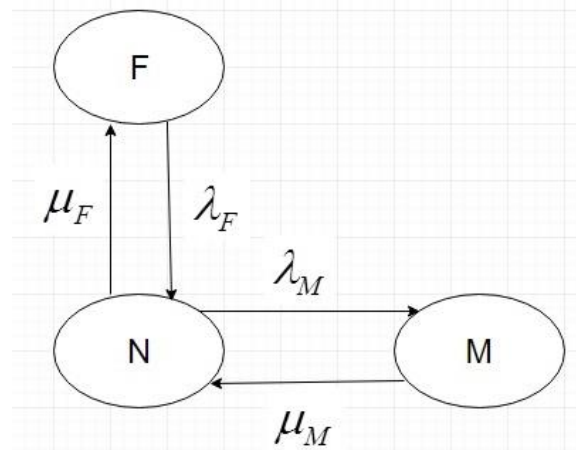


Figura 1 – Diagrama de Transições de Estados de Markov

Na FIGURA 1 N é o estado normal (equipamento disponível para operação), M é o estado de manutenção (equipamento em manutenção programada), F é o estado de falha (equipamento em manutenção não-programada; compreende o ciclo falha-reparo). O desenvolvimento detalhado é mostrado em (7) e foi deduzido que a probabilidade de um equipamento falhar (entrar em manutenção não-programada) é dada por:

$$P_F = \frac{\lambda_F(1 - F_M m)}{1 + \lambda_F r} \quad [1]$$

onde m é o tempo médio de execução de manutenção programada, r é o tempo médio de execução de manutenção não-programada, F_M é a frequência de manutenções programadas, F_F é a frequência de manutenções não-programadas e λ_F é a taxa de transição entre os estados de operação normal e manutenção não-programada, dada por:

$$\lambda_F = \frac{F_F}{1 - F_M m - F_F r} \quad [2]$$

Por outro lado considerando as penalidades legais definidas na REN 270/2007 vem, conforme (7), que:

$$PV(F_M) = \frac{PB}{720} (K_p \Lambda_1) \quad [3]$$

$$PV(P_F) = \frac{PB}{720} (K_o P_F) \quad [4]$$

$$B(F_M) = \begin{cases} \Lambda_2 & \text{se } mF_M \leq R_{FP} \text{ e } rP_N \lambda_F \leq R_{FO} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [5]$$

onde P_N é a probabilidade de um equipamento estar em operação normal (não estar em manutenção); $PV(F_M)$ é o desconto de Parcela Variável referente à aplicação de F_M ; $PV(P_F)$ é o desconto de Parcela Variável referente à P_F ; PB é a parcela equivalente ao duodécimo da Receita Anual Permitida (RAP) associada à plena disponibilização das instalações de transmissão que compõem um ativo de transmissão; f (franquia) é a duração máxima admissível de desligamentos um ativo de transmissão no período contínuo móvel de doze meses, até a qual não se aplica o desconto de Parcela Variável; K_p fator multiplicador para desligamento programado; K_o

fator multiplicador para desligamento não programado; $B(F_M)$ é o bônus, ou valor a ser adicionado à Receita Anual Permitida referente à não utilização total da franquia do equipamento; R_{FP} e R_{FO} são, respectivamente, os adicionais vinculados a um ativo de transmissão quando a duração de Desligamentos Programados e Outros Desligamentos acumulada no período contínuo de doze meses anteriores ao mês base, incluindo este, for igual ou inferior aos correspondentes valores estabelecido na Resolução ANEEL 270/2007. Além disso:

$$P_N = \frac{1 - F_M m}{1 + \lambda_F r} \quad [6]$$

$$\Lambda_1 = \max(F_M m - f, 0) \quad [7]$$

$$\Lambda_2 = \frac{PB}{720} (K_p R_{FP} + K_o R_{FO}) \quad [8]$$

Para (8), a grande relevância da manutenção programada se dá pelo fato de que todos os equipamentos falham e estas falhas podem gerar grandes consequências aos processos produtivos, consequências estas que nem sempre são de mesma gravidade. Em sistemas de energia elétrica, as falhas significam: perturbações, desconformidades nos parâmetros de controle da eletricidade, perdas por indisponibilidade, ineficiência, desperdício de insumos, horas-extras, estoques altos, enfim, uma série de prejuízos que podem ser traduzidos em unidade financeira, através do custo. Além disso, em serviços de concessões públicas, existem falhas que têm uma conotação bastante negativa e de percepção imediata pelo consumidor. Neste sentido, a alta confiabilidade não é unicamente desejável, é essencial. Assim sendo, a consideração da confiabilidade e o custo, em conjunto, permite o estabelecimento de uma programação de manutenção preventiva mais estruturada e que mais facilmente alcance seu objetivo de preservação do sistema elétrico em estados específicos de desempenho. Daí, define-se P_F como a medida de risco. Por outro lado, tal medida é controlada por F_M (variável controlada) e F_F (constante que pode ser determinada pelo histórico de observações). Concomitantemente ao risco, devem ser consideradas as perdas inerentes ao desenvolvimento do processo de manutenção que são designadas por:

$$P(F_M) = C(F_M) + PV(F_M) + P(P_F) - B(F_M) \quad [9]$$

onde $C(F_M)$ é o custo marginal referente à aplicação de F_M (e compreende todos os gastos monetários em materiais, logística e recursos humanos).

Tais medidas, numa primeira análise, são conflitantes. Por exemplo, um aumento de F_M pode deixar o equipamento mais confiável, mas a um custo que possa inviabilizá-lo financeiramente como ativo. Por outro lado, uma redução de F_M pode levar o equipamento a níveis de confiabilidade não desejáveis. Para resolver, matematicamente, este conflito, define-se a taxa de conflito de escolha denotada por TCE:

$$TCE = - \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad [10]$$

onde:

$$\Delta P = \frac{P(F_M)_{atual} - P(F_M)_{anterior}}{P(F_M)_{anterior}} \quad [11]$$

$$\Delta R = \frac{P_F(F_M)_{atual} - P_F(F_M)_{anterior}}{P_F(F_M)_{anterior}} \quad [12]$$

Segundo (3), pode-se dizer que a TCE de um ativo de transmissão mede a variação proporcional dos custos do processo de manutenção em função de uma variação proporcional no risco. Assim para $TCE < 1$ indica uma decisão onde a confiabilidade tem importância maior que as perdas monetárias (menor apetite por risco). Por outro lado, $TCE > 1$ leva a uma solução onde a questão financeira é mais relevante. A situação de equilíbrio é atingida quando $TCE = 1$, ou seja, a redução de uma unidade de ΔR é compensada pelo acréscimo de uma unidade de ΔP . Daí, uma vez definida uma relação TCE desejável, determina-se a frequência ótima de manutenções (F_M) do equipamento (ativo), e a partir desta o intervalo entre manutenções ótimo deste ativo de transmissão. Assim tratada, a grandeza estocástica confiabilidade foi transformada numa grandeza determinística (tempo). Além disso, percebe-se que a logística da programação de atividades de manutenção para equipamentos do setor elétrico envolve: cálculo das exigências de apoio e suporte; planejamento e gerenciamento das provisões, suprimentos, estoques, movimentação, transporte, rede de distribuição, rede de informações; desdobramento de recursos e sua retirada de acordo com o planejamento de contingências; aquisição e o gerenciamento de recursos humanos e materiais; emprego coordenado de instalações, bens fixos e recursos.

Do ponto de vista teórico, verifica-se que o problema apresenta complexidade significativa para a tomada de decisão por parte dos agentes envolvidos. Do ponto de vista prático, ao depararem-se com problemas de tal natureza, os operadores de equipamentos elétricos ainda precisam lidar com a abordagem dinâmica presente na maioria dos casos, ou seja, como se não bastasse a complexidade intrínseca de cada enunciado, os acontecimentos, na medida em que sucedem, agregam novas características e parâmetros aos já complexos problemas em questão. Para solucionar todas estas questões foi desenvolvido, baseado em (4), o modelo matemático a seguir.

Parâmetros de Entrada: I número de períodos de manutenção, ou seja, número de horas, dias, meses etc que será subdividido o horizonte de programação; J número de equipamentos manuteníveis; F_{Mj} frequência ótima de manutenção do equipamento j ; t_{1j} tempo de vida útil do equipamento j no início do horizonte de programação; G_k grupo operativo funcional k , ou seja, conjunto de um ou mais equipamentos do objeto de estudo que desempenham uma função conjunta ou de natureza sistêmica; K número de grupos operativos funcionais; DG_{ki} disponibilidade operativa do grupo G_k exigida no período i ; J_k conjunto de índices j de equipamentos pertencentes ao grupo funcional G_k ; CAP_i capacidade logística das equipes de manutenção no período i ; m_j tempo de manutenção do equipamento j ; $PFPPV_j$ parte da franquia de Parcela Variável referente equipamento j ; k_j inteiro positivo referente ao equipamento j ; p_j inteiro positivo referente ao equipamento j .

Penalidades : w_1 se a quantidade de manutenções for superior a CAP_i ; w_2 se a quantidade de manutenções for inferior a CAP_i ; y_{1j} por retirar um equipamento com um certo tempo de vida útil disponível; y_{2j} por não retirar um equipamento sem tempo de vida útil disponível; z por retirar para manutenção um equipamento em períodos intercalados inferiores ao ciclo p_j .

Variável de decisão: $x_{ij} = 1$ se o equipamento j estiver em manutenção no período i , 0 caso contrário.

Função Objetivo:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^I \left[a_i + \sum_{j=1}^J (b_{ij} + c_{ij}) \right] \quad [13]$$

Restrições:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} \leq DG_{ki} \text{ onde } i = 1, \dots, I \text{ e } k = 1, \dots, K \quad [14]$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} (m_j) \geq PFPPV_j \quad [15]$$

$$x_{(i+1)j} = x_{(i+2)j} = \dots = x_{(i+m_j)j} \text{ se } x_{ij} = 1 \quad [16]$$

$$a_i = \begin{cases} \left(\sum_{j=1}^J x_{ij} m_j - CAP_i \right) w_1 & \text{se } \sum_{j=1}^J x_{ij} m_j \geq CAP_i \\ \left(CAP_i - \sum_{j=1}^J x_{ij} m_j \right) w_2 & \text{se } \sum_{j=1}^J x_{ij} m_j < CAP_i \end{cases} \quad [17]$$

$$b_{ij} = \begin{cases} (t_{ij}) y_{1j} - 1 & \text{se } x_{ij} = 1 \text{ e } t_{ij} \geq k_j \\ y_{2j} & \text{se } x_{ij} = 0 \text{ e } t_{ij} = 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [18]$$

$$c_{ij} = \begin{cases} z & \text{se } x_{(i+m_j+n)j} = 1 \text{ e } x_{ij} = 1 \quad \{n \in \mathbb{N} / n \leq p_j\} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [19]$$

$$t_{(i+1)j} = \begin{cases} t_{ij} - 1 & \text{se } x_{ij} = 0 \\ \frac{1}{F_{Mj}} & \text{se } x_{ij} = 1 \end{cases} \quad [20]$$

A equação [13] determina o custo geral de uma determinada solução de programação de manutenção num horizonte de tempo definido para o objeto de estudo, o argumento do seu minimizador é o calendário viável ótimo. A equação [14] é uma restrição que leva em conta as necessidades do sistema elétrico de manter alguns conjuntos de equipamentos disponíveis em determinados períodos de tempo. A equação [15] refere-se à necessidade de utilização mínima de parte da franquia, esta garante a realização mínima de um período de manutenções em referência à franquia deste equipamento, uma vez que a não realização contínua de manutenções pode acarretar em redução não desejável da mesma. A equação [16] é uma restrição referente ao tempo de realização de manutenção preventiva, depois que o equipamento entra em processo de manutenção, o mesmo só pode voltar a estar disponível para operação depois de transcorrido o tempo m_j de realização desta manutenção. A equação [17] refere-se ao custo do problema logístico, pois as equipes de manutenção possuem capacidade limitada, isto é, possuem uma quantidade de equipamentos suportada que podem estar em manutenção, quando esta capacidade é extrapolada um custo deve inferido na função objetivo pela sobreutilização da equipe. Por outro lado, deixar as equipes operarem abaixo de sua capacidade também gera despesas, provenientes da manutenção ociosa da mesma, portanto, o ideal é que as equipes operem sempre com toda sua capacidade. A equação [18] refere-se ao custo ponderado do problema de confiabilidade/ativo. Assume-se que o respeito ao modelo garanta a minimização, simultânea, dos custos de manutenção e do risco de falha, quando um equipamento é retirado para manutenção preventiva muito antes do término do seu tempo de vida útil deve ser adicionado um custo na função objetivo, decorrência da atividade de manutenções desnecessárias e perda de confiabilidade devido a falhas induzidas, por outro lado, deixar um equipamento operar sem tempo de vida útil gera uma situação de confiabilidade não desejável, assim infere-se outro custo na função objetivo. Logo, o ideal é que um equipamento seja retirado para manutenção próximo do término do seu tempo de vida útil. A equação [19] corresponde ao refinamento de calendário, ou seja, uma penalidade aplicada quando um equipamento é retirado para manutenção com tempos inferiores a p_j períodos. Finalmente, a equação [20] determina uma regra para determinação do tempo de vida útil do equipamento j no período $i+1$.

5.0 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

Os métodos de solução para o problema de programação de manutenção podem ser classificados em exatos e heurísticos. Os métodos exatos geralmente se baseiam em procedimentos de enumeração implícita em árvore, conhecidos como branch-and-bound (B&B), e têm aplicação limitada, pois tais técnicas não são eficientes em termos computacionais, para alguns problemas de médio e grande porte. Outra forma relativamente simples de ser implementada, mas inviável por ser muito custosa do ponto de vista computacional, são os procedimentos de enumeração exaustiva de procura por soluções. Para (9), há uma grande variedade de problemas de otimização para os quais nenhum algoritmo eficiente foi desenvolvido que consiga obter um ótimo global, mas em muitos casos é possível aplicar técnicas eficientes que retornam respostas satisfatórias. Em decorrência da incapacidade específica dos métodos exatos, métodos heurísticos compõem o principal foco de interesse para a resolução do problema proposto. Heurísticas são procedimentos de solução que muitas vezes se apóiam em uma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema possa ser considerada e explorada de forma inteligente, para a obtenção de uma solução adequada. Segundo (10), heurísticas são normalmente conhecidas como procedimentos que procuram por uma solução ótima sem, no entanto, garantir que será possível encontrar uma. Para (11), uma técnica heurística (ou simplesmente, uma heurística) é um método que procura por boas soluções (próxima da ótima) a um custo computacional adequado sem ser possível garantir otimalidade e, possivelmente, exequibilidade. Infelizmente, pode ser que nem mesmo seja possível afirmar o quão perto da solução ótima uma solução heurística esteja. Muito embora a definição possa parecer desanimadora, muitos procedimentos heurísticos atuais são capazes de alcançar soluções muito boas para casos práticos de problemas combinatoriais complexos.

Assim, para resolver satisfatoriamente problemas de programação de interesse prático é imperioso empregar técnicas de resolução ditas aproximadas, que embora sem a garantia de achar uma solução ótima, são capazes de fornecer uma solução não muito distante dela, sem consumir grandes quantidades de tempo e memória computacionais. Esta é a razão de haver um grande esforço na direção de desenvolver heurísticas para problemas

de programação. De acordo com (12), algoritmos genéticos - GA (do inglês Genetic Algorithms) são parte da computação evolucionária (do inglês Evolutionary Algorithms) inspirados na teoria da evolução de Darwin. Os problemas são resolvidos através de um processo evolutivo que resulta na melhor (mais adequada) solução (a sobrevivente). O algoritmo começa com um conjunto de soluções (representadas por cromossomos) chamadas de população. As soluções geradas partindo de uma população são utilizadas para formar uma nova população de soluções. Isto é motivado pela expectativa de que a nova população será melhor do que a primeira. Soluções para formar novas gerações (de soluções) são selecionadas de acordo com sua adequação e, quanto melhores, mais chances de reprodução e sobrevivência terão. O processo é repetido até que alguma condição de parada seja satisfeita como a perda de diversidade das populações ou o aperfeiçoamento da melhor solução seja atingido.

5.1 Algoritmo GA

```

Geração=0
Inicialização
Avaliação da População
  Enquanto diversidade  $\geq$  número determinado
    Seleção dos pais
    Cruzamento dos pais
    Mutação da população gerada
    Avaliação da população gerada
    Geração = Geração+1
  fim
fim

```

Inicialmente é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de 1000 indivíduos (que representam soluções factíveis do problema). Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada (através da equação [13]), sendo que para cada indivíduo é atribuída a sua aptidão bruta. São selecionados 10% dos melhores indivíduos (contando repetições) é selecionada para formar o conjunto dos pais da geração seguinte, enquanto os demais são descartados. Esta estratégia é chamada CHC (do inglês Cross generational elitist selection, Heterogeneous recombination and Cataclysmic mutation). Após o cruzamento dos pais, feito aleatoriamente, a população atual é descartada e são gerados 990 novos indivíduos para a futura população. Além disso, os melhores indivíduos da geração anterior sobrevivem e compõem 1% da atual população (recompondo assim o número de 1000 indivíduos). Tal técnica é chamada de Genitor, ou seja, um algoritmo cujos melhores pontos encontrados são preservados na população e resulta em uma busca mais agressiva, que na prática é geralmente bastante efetiva. No entanto, existe o perigo de uma convergência prematura para mínimos locais principalmente quando usado em populações pequenas (como no caso em estudo). O ponto de cruzamento para reprodução é sempre a metade do cromossomo. Para evitar o problema de convergência prematura para mínimos locais é utilizada uma alta taxa de mutação, de 10%. O processo acima, chamado de reprodução, é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. Classicamente, existem três critérios de parada para o GA: número de gerações, obtenção de uma solução (quando esta é conhecida) e perda de diversidade. Como no problema estudado não existem soluções conhecidas, foi adotado um máximo de 100 gerações e um mínimo de 2% de diversidade genética do conjunto de pais.

6.0 - ESTUDO DE CASO

A aplicação real da metodologia proposta dependeria da disponibilização dos equipamentos do objeto do estudo à reestruturação da programação de manutenção elaborada. No entanto, em virtude da originalidade da proposta tal opção se tornou ineficaz, o que não impede que isto seja feito no futuro, em um próximo estudo. Assim, os testes aqui realizados foram utilizados para comparar a real gestão da programação de manutenção no objeto de estudo (sobre as mesmas hipóteses de entrada) com a desenvolvida neste estudo, considerando o horizonte de tempo passado entre 03 de Junho de 2008 a 31 de maio de 2010, em dois períodos anuais discretos.

Como metodologia de manutenção (confecção e tratamento do banco de dados de entrada) foi escolhida a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC). Tal opção se justifica no fato que a maioria das empresas do Setor Elétrico Brasileiro adota esta metodologia. Com este conceito, foi determinado um sistema (objeto do estudo), com fins meramente experimentais, composto pelos seguintes equipamentos: a Linha de Transmissão Itaberá - Tijuco Preto circuito 2, o Banco de Capacitores 10 e o Autotransformador 5 da Subestação Tijuco Preto. Assim, foram abrangidas todas as funções transmissão determinadas na resolução ANEEL 270/2007. Além disso, tal escolha, também, possui um caráter elétrico funcional lógico, pois compreendem os equipamentos básicos da transmissão.

Considerando o Período I (de 03/06/2008 a 31/05/2009) foram testados os procedimentos com dados de entrada reais. Os testes seguintes, Período II (de 01/06/2009 a 31/05/2010), compararam a metodologia considerando dois módulos de dados de entrada: a execução hipotética da solução encontrada no Período I (Caso 1) e com dados de execução real (Caso 2). Todas as rotinas foram implementadas em MATLAB (13). Os resultados foram obtidos em um computador pessoal com processador Intel Atom N270, de 1,6 GHz que possui 1 GB de memória RAM, usando

o sistema operacional Windows XP. A TABELA 1 mostra os resultados das simulações, onde MS denota o método de solução empregado (SI solução inicial determinada em [7], GA Algoritmo Genético e AP são os dados reais apurados), fob_{out} é o valor da função objetivo de saída após aplicação do método de solução, PVI valor monetário (R\$) de Parcela Variável por Indisponibilidade consumida pela solução obtida, T_M é o tempo (em horas) de equipe de manutenção consumido, APV valor monetário (R\$) do adicional de Parcela Variável obtido pela solução, e t é o tempo (em segundos) de processamento da solução.

Tabela 1 – Resultados

MS	fob_{out}	PVI	T_M	APV	t
Período I					
SI	166050	62.028,89	39	352.996,91	—
GA	156050	62.028,89	39	352.996,91	3216
AP	1,662x10 ⁹	239.967,74	41	249.330,85	—
Período II					
Caso 1					
SI	155050	92.996,83	49	352.996,91	—
GA	165550	92.996,83	49	338.631,87	4179
AP	2,139x10 ⁹	1.636.768,42	156	85.135,85	—
Caso 2					
SI	135500	0,00	20	282.226,10	—
GA	135500	0,00	20	282.226,10	1219
AP	3,579x10 ⁹	1.636.768,42	156	85.135,85	—

Os dados (reais) apurados, preparação do estudo, formação do banco de dados, detalhes da implementação e parametrização dos modelos e método de solução, e demais resultados computacionais obtidos estão em (7). Nota-se, em todos os casos, que o valor de PVI utilizando GA foi muito menor que o valor real apurado (AP). Além disso, o tempo consumido pelas equipes de manutenção T_M também foi menor, bem como APV foi maior. Ou seja, as soluções encontradas pelo GA resultaram em expressiva economia.

Em função dos resultados experimentais obtidos, pode-se dizer que os testes realizados atingiram os seus objetivos e mostraram ser correta a expectativa quanto ao método proposto para a otimização do problema de programação de manutenção, ou seja, o método proposto pode contribuir de maneira a agregar características vantajosas à racionalização efetiva dos recursos envolvidos neste processo. A validação do modelo pôde ser confirmada pelo comportamento da função objetivo nos diversos casos abordados em contraste ao caso real. Praticamente todos os procedimentos de teste efetuados evidenciam, de maneira muito clara, que as boas soluções, ou seja, aquelas que consumiram menos os recursos (com melhor distribuição na janela de programação) associadas com melhores índices de confiabilidade dos equipamentos, apresentaram o menor valor de função objetivo. O Algoritmo Genético demonstrou ser um método de solução promissor, considerando as instâncias de testes realizadas, pois este demonstrou ser a técnica robusta (encontrou as melhores soluções nos casos estudados). Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta apresentou melhoria relativa significativa em todos os casos e aspectos avaliados. Assim, demonstraram a grande viabilidade de se implementar os procedimentos do estudo a problemas reais. Muito embora ainda continue a ser explorada, a metodologia proposta solucionou muito bem o problema de programação de manutenção estudado.

7.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho foi elaborado visando à melhoria da eficiência e confiabilidade da indústria da energia elétrica. Na sua execução, foram apresentadas algumas contribuições do ponto de vista técnico e teórico. Conforme comentado anteriormente, a natureza combinatorial do problema de programação proposto neste trabalho, que também apresenta características típicas, amplia significativamente o número de diferentes possibilidades de cronogramas, dificultando sobremaneira a definição de uma solução perfeitamente adequada aos objetivos pretendidos. Observa-se mesmo assim que, nas soluções encontradas através dos testes computacionais, os cronogramas obtidos apresentaram uma alocação de desligamentos dos equipamentos ao longo do tempo bastante coerente, mostrando a capacidade que a sistemática desenvolvida possui para otimizar, de maneira consistente, planos de manutenção e, desta forma, ser utilizada como ferramenta de apoio para a tomada de decisões nesta área. Portanto, considera-se que este objetivo específico do trabalho foi atingido, sendo necessário, entretanto considerar as características da metodologia empregada e fazer uso da ferramenta com visão crítica.

Em relação aos objetivos de análise e determinação da programação de manutenção dos ativos de transmissão do Sistema Elétrico verifica-se que o emprego da sistemática proposta pode vir a atendê-los. As preocupações com as restrições sistêmicas em um determinado período e a gestão adequada dos recursos de manutenção são aspectos que estão essencialmente incorporados à proposta do estudo. Mas, para incorporá-las de fato, seria necessário ampliar o objeto de estudo para, ao menos, uma instalação elétrica real, inserindo e submetendo todos seus equipamentos e estrutura logística de manutenção ao método de programação proposto. Todavia, deve-se atentar para o fato de que a incorporação de novos elementos aumenta exponencialmente as possibilidades de

configurações de soluções para os quais deverão ser calculados as características do plano de programação e devidamente otimizadas pela aplicação do método de solução no modelo matemático do problema, intensificando, assim, o uso de recursos computacionais, o que entretanto não impede sua aplicação prática. Como esta foi uma pesquisa piloto, existem muitas alternativas para desenvolvimentos futuros tais como: a integração de outros aspectos ligados a execução e logística da manutenção em um sistema especialista independente; inserir no processo de otimização a distribuição de desligamentos no interior dos subperíodos discretos de programação, identificando o melhor arranjo para cada configuração; testes de novos método de solução.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MOTTA, S.B. Periodicidade de manutenções preventivas em dispositivos de proteção de sistemas elétricos de potência; aplicação quantitativas de técnicas quantitativas de confiabilidade à engenharia de manutenção; UFMG, Brasil, 1999.
- (2) ANDERS, G.J. Probability Concepts in Electric Power System, A Wiley-Interscience publication, EUA, 1990.
- (3) PEREIRA, F.E.L. Determinação do intervalo de manutenção programada da proteção de linhas de transmissão considerando-se penalidades associadas à indisponibilidade, PUC, Brasil, 2001.
- (4) ABRAHÃO, F.T.M. A meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva de uma frota de veículos com múltiplas restrições: aplicação na força aérea brasileira, USP, Brasil, 2006.
- (5) ULYSSÉA, M.S. O setor elétrico brasileiro - uma aventura mercantil, UFSC, Brasil, 2002.
- (6) O'CONNOR, P.D.T. Practical reliability engineering, John Wiley & Sons Inc., EUA, 1995.
- (7) ARAUJO NETO, J. E. Otimização da programação da manutenção dos ativos de transmissão do sistema elétrico brasileiro considerando penalidades por indisponibilidade, restrições sistêmicas e logística das equipes técnicas, UNICAMP, 2011.
- (8) CAVALCANTE, C.A.V. ALMEIDA, A.T.; Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza, SOBRAPO, Brasil, 2005.
- (9) COSTA A.L.; Determinação ótima do intervalo entre as manutenções preventivas de equipamentos elétricos, UFSC, Brasil, 1995.
- (10) GREENBERG, H. Mathematical programming glossary, <http://www.hp.cundever.edu/~hgreenbe/glossay>
- (11) RAYWARD-SMITH, V.J., REEVES, L.H., SMITH, C.R. Modern heuristic search methods, John Wiley & Sons, EUA, 1996.
- (12) OBTIKO, M.E., SLAVIK, P. Visualization of Genetic Algorithms in a Learning Environment, Spring Conference on Computer Grafics, Bratislava, Eslováquia, 1999.
- (13) <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- (14) ARAUJO NETO J. E., MORETTI, A.C., CASTRO, C.A. Transmission Asset Maintenance Programming Optimization – The Brazilian Electric System Case, IEEE Latin America Transactions, EUA, Maio 2015.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Evangelista Araujo Neto nasceu em 1977 na cidade de Belo Horizonte - MG. É graduado em Matemática pela Universidade do Estado de Minas Gerais, Passos, Minas Gerais, Brasil, em 2002. Obteve o título de mestre em Matemática Aplicada pela UNICAMP, Campinas, São Paulo Brasil, em 2011. Atualmente trabalha em FURNAS e cursa doutorado em Engenharia Elétrica na UNICAMP e suas pesquisas se concentram na área Pesquisa Operacional no tema: otimização da programação da manutenção de equipamentos elétricos de potência do setor elétrico.



Carlos Alberto de Castro Junior nasceu em na cidade de Campinas - SP. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo Brasil, em 1982. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela UNICAMP, em 1985 e de doutor em Engenharia Elétrica pela Arizona State University, Estados Unidos, em 1993. Atualmente é professor titular da UNICAMP e suas pesquisas se concentram na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência.