



Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE

Programação Ótima da Manutenção dos Equipamentos de Transmissão do Setor Elétrico Brasileiro

**JOSE EVANGELISTA ARAUJO NETO(1); CARLOS ALBERTO DE CASTRO JUNIOR(2);
FCE(1);UNICAMP(2);**

RESUMO

Este texto propõe um procedimento para solucionar o problema da gestão da programação de manutenção dos equipamentos de alta tensão fundamentado na relação confiabilidade/custo (gestão de ativo), com a expectativa de encontrar o melhor encadeamento para execução dessas atividades em um determinado horizonte de planejamento, baseado em um modelo matemático que respeite as restrições do Sistema Elétrico, sendo este resolvido através de uma combinação de regras heurísticas e programação dinâmica.

PALAVRAS-CHAVE

Programação, Manutenção, Transmissão, Confiabilidade, Heurística

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma concessionária 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 empresas de serviços públicos de transmissão de energia elétrica caso os equipamentos de suas subestações sejam desligados por acidente, falha ou manutenção programada. Tratamentos tradicionais de manutenção em sistemas de transmissão de energia elétrica se embasam em ações realizadas periodicamente, ou programadas, de acordo com uma análise de necessidades. Embora essas metodologias tenham o intuito de melhorar o desempenho destes sistemas, geralmente não há uma avaliação precisa do resultado das ações de manutenção na confiabilidade correlacionada aos recursos empregados.

O objeto assim formulado define um problema de otimização combinatória com o propósito de encontrar o encadeamento das ações de manutenções que minimizem os recursos utilizados em manutenções e garanta um nível de confiabilidade esperado. Este trabalho propõe uma abordagem para enfrentar este problema baseada na relação confiabilidade/custo com a expectativa de encontrar os melhores planos para a realização de manutenções em equipamentos (ativos) de transmissão de energia elétrica, apresentando um modelo matemático para a confecção de um calendário factível (que respeite as restrições do Sistema Elétrico) para programação de manutenção nestes ativos e um método de solução para encontrar as melhores soluções em um determinado horizonte de planejamento.

2.0 - O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO

O problema proposto pode ser delineado como a programação da manutenção vivenciada por um sistema que possua um conjunto de equipamentos sujeito a restrições de diversas ordens. Desta forma, a solução será encontrar um calendário viável para disponibilização de equipamentos para manutenção concatenada com a

melhor utilização dos recursos existentes e de acordo com as restrições impostas. Entretanto, planejar o momento mais propício para realizar a intervenção de manutenção é uma tarefa complexa, pois a solução envolve várias características do problema, sendo que cada uma pode ser interpretada como sendo uma função a ser satisfeita. Tais características, numa primeira análise, são conflitantes e exigem uma solução de compromisso. Espera-se que esta solução contemple: a maximização da utilização da capacidade logística das diversas equipes de manutenção; maximização da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos para o Sistema Elétrico; e a minimização das perdas e custos financeiros decorrentes dos processos de manutenção. Não obstante, a solução, na maioria dos casos, está condicionada à autorização do Operador Nacional do Sistema (ONS) que determina as condições de operação sistêmica.

A dificuldade de encontrar soluções para o problema é exponencial na medida em que cada intervalo de programação apresenta no mínimo 2^{mn} possíveis soluções (onde m denota o número de períodos de tempo do calendário de programação e n representa o número de equipamentos). Além disso, o mesmo apresenta semelhanças com problemas do tipo NP-Completo, ou seja, não há comprovação de que existem algoritmos com tempo de execução limitada por uma função polinomial (da ordem do número de variáveis) que o solucionem. Por outro lado, as áreas de manutenção das concessionárias do setor elétrico brasileiro vêm convivendo com determinados problemas, dentre os quais: grande quantidade, diversidade e complexidade dos equipamentos; diversidade e alta complexidade dos instrumentos de testes de manutenção; escassez de mão-de-obra especializada; falta de padronização dos métodos de trabalho; dificuldades no fluxo e registro de informação na gestão da manutenção; terceirização dos serviços de manutenção e perda de domínio tecnológico; obsolescência de equipamentos.

2.1 O Marco Relatório do Problema

Até 1998, o marco regulatório do Sistema Elétrico Brasileiro era definido num imenso fórum coordenado pela ELETROBRAS no qual participavam todas as empresas (em geral estatais) que nele operavam, chamado GCOI (Grupo Coordenador da Operação Interligada). O faturamento destas empresas era obtido através da venda direta de energia elétrica entre si ou a um consumidor direto. A rede de transmissão era vista como um meio de viabilizar este objetivo, e uma boa política de manutenção tinha somente a função de não prejudicar este fim. No período entre 1998 e 2002 foi implantado um novo modelo em que foram inseridos novos agentes tais como ONS (Operador Nacional do Sistema), MAE (Mercado Atacadista de Energia) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e todo o arcabouço legal necessário ao suporte dos novos negócios de geração, transmissão e distribuição e das atividades de compra e venda de energia elétrica, levando em conta as características do ambiente competitivo com atuação de agentes privados e estatais. Em março de 2004, o Governo estabeleceu as diretrizes para construção de outro modelo para o setor elétrico, buscando a segurança no suprimento, modicidade tarifária e universalização do atendimento. O MAE foi substituído pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), observando uma tendência de fortalecimento do Ministério das Minas e Energia.

Em 03 de junho de 2008, entra em vigor a resolução da ANEEL 270/2007 e a partir desta data todos os equipamentos de tensão maior ou igual a 230 kV (com poucas exceções) pertencentes às empresas do setor elétrico passaram a gerar receitas dependendo de sua disponibilidade. Posteriormente foram promulgadas as resoluções normativas 729/2016, 782/2017 (alteram as regras de apuração dos desligamentos, restrições operativas temporárias e cancelamentos em instalações de transmissão) e 669/2015 (regulamenta os Requisitos Mínimos de Manutenção). Neste contexto, acentuou-se o lugar de destaque das áreas de manutenção das concessionárias de energia elétrica, sendo estas cada vez mais exigidas a responder aos desafios que se apresentam com relação à melhoria da relação custo/benefício das suas atividades.

3.0 - 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. Um departamento de Engenharia de uma empresa deve estar apto a 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 e a confiabilidade do sistema de transmissão. A estratégia de modelagem aplicada neste trabalho consiste de duas partes: (a) minimizar custos de manutenção e o risco de falha, baseado em (2); e (b) confecção do calendário viável com otimização logística, baseado em (3).

Para (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. 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. Estes modelos podem ser utilizados para representar, por exemplo, o processo de deterioração de equipamentos, manutenções preventivas, falhas aleatórias etc. Assim o modelo Markoviano desenvolvido neste trabalho está representado pelo diagrama de transição mostrado na Figura 1.

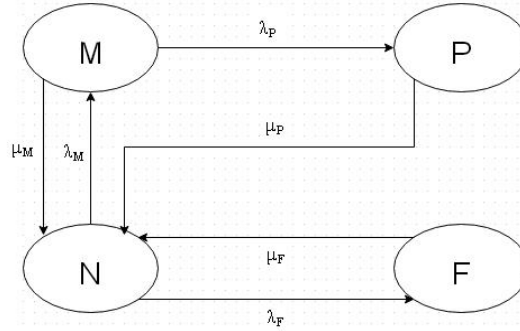


FIGURA 1 – Diagrama de transição Markoviano

Os estados representados são: N normal - equipamento disponível para operação; M manutenção - equipamento em manutenção programada; P prorrogação - equipamento em manutenção prorrogada; F falha - equipamento em manutenção não programada (compreende ciclo falha-reparo). As grandezas " λ_M, μ_F, \dots " são chamadas taxas de transição entre estados e representam a probabilidade de um ativo estando num dado estado x transite para o estado y . A matriz de transição de estado do modelo é dada por [1].

$$T = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_M - \lambda_F & \lambda_M & 0 & \lambda_F \\ \mu_M & 1 - \mu_M - \lambda_P & \lambda_P & 0 \\ \mu_P & 0 & 1 - \mu_P & 0 \\ \mu_F & 0 & 0 & 1 - \mu_F \end{bmatrix} \quad [1]$$

Como todas as taxas de transição são maiores que zero e bem menores que 1, verifica-se que T^2 tem todos os elementos positivos, portanto T é regular. Daí resta calcular o ponto fixo da matriz P para determinar o vetor de probabilidades dos estados em regime permanente. Denotando este vetor como $X = [P_N \ P_M \ P_P \ P_F]$ (onde P_Y é a probabilidade do item/equipamento estar no estado "Y"), vem da solução do sistema $XT = X$ que a probabilidade de um equipamento falhar (entrar em manutenção não programada), será dada por [2].

$$P_F = \frac{\lambda_F}{(\lambda_F + \mu_F)} \left[1 - F_M m \left(1 + \frac{\lambda_P}{\mu_P} \right) \right] \quad [2]$$

onde: m é o tempo médio de execução de manutenção programada e F_M é a frequência de manutenções programadas.

As resoluções da ANEEL estabelecem o desconto da remuneração (Parcela Variável - PV) paga pelo agente de transmissão de um ativo de transmissão (equipamento) devido indisponibilidades deste em determinado num período. Para (1), a grande relevância da manutenção programada é a prevenção de falhas, uma vez que, conceitualmente, todos os equipamentos falham e estas falhas podem gerar consequências aos processos produtivos, consequências estas que nem sempre são de mesma gravidade. Em sistemas de energia elétrica, as falhas implicam em: perturbações, desconformidades nos parâmetros de controle da eletricidade, perdas por indisponibilidade, ineficiência, desperdício de insumos, horas-extras, estoques altos, enfim, uma série de prejuízos financeiros. Neste sentido, a alta confiabilidade não é unicamente desejável, é essencial. Assim, a consideração conjunta da confiabilidade e do custo permite o estabelecimento de uma programação de manutenção mais estruturada e que alcance seu objetivo de preservação do sistema elétrico em estados específicos de desempenho. Definindo P_F como a medida de risco, resta considerar os investimentos inerentes ao desenvolvimento do processo de manutenção, que são designadas por [3].

$$I(F_M) = C(F_M) + PV(F_M) + PV(P_F) + PV(P_P) \quad [3]$$

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); $PV(F_M)$ é o desconto de PV referente à aplicação de F_M ; $PV(P_F)$ o desconto de PV referente à ocorrência hipotética da P_F ; $PV(P_P)$ o desconto de PV referente à ocorrência hipotética da probabilidade de prorrogação P_P .

Tais medidas, numa primeira análise, são conflitantes, ou seja, 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 (TCE) como:

$$TCE = -\frac{\Delta R}{\Delta I} \quad [4]$$

onde:

$$\Delta I = \frac{I(F_M)_{atual} - I(F_M)_{anterior}}{I(F_M)_{atual}} \quad [5]$$

$$\Delta R = \frac{P_F(F_M)_{atual} - P_F(F_M)_{anterior}}{P_F(F_M)_{atual}} \quad [6]$$

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, $TCE > 1$ 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 ΔI . Uma vez escolhida uma relação TCE desejável, determina-se a frequência ótima de manutenções (F_M) do equipamento (ativo), dado por [7], e a partir desta o intervalo ótimo entre manutenções deste ativo.

$$F_M = \frac{(TCE)k_3 - k_1k_2}{(TCE + 1)k_1k_3} \quad [7]$$

onde: $k_1 = m \left(1 + \frac{\lambda_P}{\mu_P} \right)$; $k_2 = 150PB \frac{\lambda_F}{(\lambda_F + \mu_F)}$; PB é a parcela referente ao duodécimo da Receita Anual

Permitida (RAP) associada à plena disponibilização do equipamento (ativo). Assim tratada, a grandeza estocástica confiabilidade foi transformada numa grandeza determinística (tempo). Finalmente:

$$k_3 = \left[\frac{C(F_M)}{F_M} + PB \left(10m - 150 \frac{\lambda_F}{(\lambda_F + \mu_F)} k_1 + 50 \frac{\lambda_P}{\mu_P} m \right) \right].$$

Por outro lado, 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 e de informações; 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 deparar-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 (3), o modelo matemático a seguir:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^I \left[a_i + \sum_{j=1}^J (b_{ij} + c_{ij}) \right] \quad [8]$$

sujeito a

$$\sum_{j \in J_k} x_{ij} \leq DG_{ik} \quad \text{onde } i = 1, \dots, I \text{ e } k = 1, \dots, K \quad [9]$$

$$x_{(i+1)j} = \dots = x_{(i+m_j-1)j} = 1 \text{ se } x_{ij} = 1 \text{ e } x_{(i-1)j} = 0 \quad [10]$$

$$a_i = \begin{cases} \left(\sum_{j \in L_i} m_j - CAP_i \right) w_1 & \text{se } \sum_{j \in L_i} m_j \geq CAP_i \\ \left(CAP_i - \sum_{j \in L_i} m_j \right) w_2 & \text{se } \sum_{j \in L_i} m_j < CAP_i \end{cases} \quad [11]$$

$$b_{ij} = \begin{cases} (t_{ij})y_{1j} & \text{se } x_{ij} = 1 \text{ e } t_{ij} \geq k_j \\ y_{2j} & \text{se } x_{ij} = 0 \text{ e } t_{ij} = 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [12]$$

$$c_{ij} = \begin{cases} z & \text{se } x_{ij} = 1 \text{ e } t_{ij} > p_j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [13]$$

$$t_{(i+1)j} = \begin{cases} t_{ij} - 1 & \text{se } x_{ij} = 0 \\ \frac{1}{F_{Mj}} & \text{se } x_{ij} = 1 \end{cases} \quad [14]$$

onde: I é o número de períodos (horas ou dias) de manutenção que será subdividido o horizonte de programação; J é o 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 equipamentos do objeto de estudo que desempenham uma função conjunta ou de natureza sistêmica; K número de grupos operativos funcionais; DG_{ik} 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 no período i ; m_j tempo de manutenção do equipamento j ; L_i conjunto de índices j tal que $x_{ij} \neq 0$ no período i ; 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 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 ; $x_{ij} = 1$ se o equipamento j estiver em manutenção no período i e $x_{ij} = 0$ caso contrário.

Cabe aqui alguns comentários sobre o modelo proposto. A equação [8] determina o custo geral de uma determinada solução de programação de manutenção, o argumento do seu minimizador é o calendário viável ótimo. A equação [9] é uma restrição que se refere às necessidades do sistema elétrico em manter alguns conjuntos de equipamentos disponíveis em determinados períodos de tempo. A equação [10] é uma restrição referente ao tempo de realização de manutenção programada. Após um equipamento entrar 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 [11] refere-se ao custo do problema logístico. Quando a capacidade das equipes de manutenção é extrapolada, um custo deve inserido na função objetivo pela superutilização da equipe. Por outro lado, a subutilização das equipes também gera despesas. A equação [12] refere-se ao custo ponderado do problema confiabilidade/ativo onde se assume que o respeito ao modelo garante uma solução de compromisso desejável dos custos de manutenção e do risco de falha. A equação [13] corresponde ao refinamento de calendário. A equação [14] representa uma regra para determinação do tempo de vida útil do equipamento j no período $i+1$.

4.0 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

Os métodos de solução para problemas de programação 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 podem não ser eficientes em termos computacionais para problemas de médio e grande porte. Em decorrência da incapacidade específica dos métodos exatos, métodos heurísticos têm sido propostos para a resolução de vários problemas complexos na área de sistemas de potência. Em especial, estes terão papel importante na proposta de resolução do problema proposto. Heurísticas são procedimentos que se apoiam em uma abordagem intuitiva na qual a estrutura particular do problema possa ser explorada para a obtenção de uma solução adequada. Também são conhecidas como procedimentos que procuram por uma solução ótima sem garantir que será possível encontrar uma. Embora a definição possa parecer desanimadora, muitos procedimentos heurísticos atuais são capazes de alcançar soluções muito boas para problemas combinatoriais complexos a um custo computacional adequado. Neste trabalho propõe-se a resolução do problema proposto em dois passos: primeiro aplica-se uma heurística construtiva para diminuir o espaço de busca para em seguida buscar a solução ótima através da Programação Dinâmica (PD). Tais procedimentos serão detalhados a seguir.

4.1 Heurística Construtiva

A heurística construtiva descrita a seguir tem por objetivo diminuir o espaço de busca, e assim tornar o processo de resolução por programação dinâmica mais eficiente. Deve-se notar que o número inteiro 37 que aparece no algoritmo a seguir foi obtido através de testes empíricos.

Início do mês corrente de programação:

Se $t_{ij} \leq 37 \Rightarrow j$ entra na lista J' (equipamentos candidatos à manutenção no período):

$$x_{ij} = 0 \quad \forall j \notin J' \quad \forall i; \text{ Se } CAP_i = 0 \Rightarrow x_{ij} = 0 \quad \forall j \in J'.$$

Execução do dia corrente de programação:

$\forall i$ tal que $CAP_i \neq 0$:

$\forall j \in J'$

Módulo de Programação Dinâmica;

se $x_{ij} = 1 \Rightarrow j$ sai da lista J' .

Retorna a matriz $X = [x_{ij}]$ de execução de manutenções do dia de programação.

4.2 Programação Dinâmica

O procedimento de programação dinâmica é descrito no algoritmo a seguir.

Para $\forall j \in J'$

Calcule $fobj(x_{ij} = 0)$ e $fobj(x_{ij} = 1)$.

$$fobj(x_{ij} = 0) \leq fobj(x_{ij} = 1) \quad \forall j \in J':$$

$$x_{ij} = 0 \quad \forall j \in J'.$$

Se existe $j_k \in J'$ tal que $fobj(x_{ij_k} = 1) < fobj(x_{ij}) \quad \forall j \in \{J' - j_k\}$:

$$x_{ij_k} = 1 \text{ e } x_{ij} = 0 \quad \forall j \in \{J' - j_k\}.$$

5.0 - ESTUDO DE CASO

5.1 Caso Real

Como objeto de pesquisa foi escolhida uma subestação real do Sistema Interligado Nacional (SIN). Foram selecionados 49 equipamentos, os quais compreendem todas as funções transmissão e equipamentos de conexão definidos pela ANEEL. Os testes computacionais foram desenvolvidos para verificar o desempenho da metodologia desenvolvida em encontrar soluções para o problema de programação de manutenção em diferentes instâncias: metodologia, modelo e técnica de solução. Para abastecer o banco de dados foi utilizado o histórico do sistema informatizado interno da empresa proprietária da subestação objeto do estudo (dados não auditados) apurado nos anos de 2012 a 2016. Quando não se dispôs de informações históricas, a opção foi determiná-las através da

inferência técnica de especialistas ou de dados de equipamentos semelhantes. Os ensaios foram utilizados para comparar a real gestão da programação de manutenção no objeto de estudo com a desenvolvida neste estudo, considerando o horizonte de tempo de 01 de janeiro de 2017 a 31 de dezembro de 2017. Durante os testes foram aplicadas as seguintes hipóteses simplificadoras (que foram determinadas durante o estudo de caso por se mostrarem bem aderentes com a realidade): existem três tipos (categorias) de manutenções distintas (CD com desligamento, SD sem desligamento e TNP trabalho no potencial - linha viva) e cada tipo é executado por uma equipe distinta, ou seja, constituem problemas separados; foi considerado somente um tipo de atividade de manutenção, por categoria; somente poderá ser realizada manutenção em no máximo um equipamento por tipo de manutenção (a menos do caso da manutenção oportunista, ou seja, aproveitar o desligamento de um ativo para se realizar manutenções em outros correlatos), serão alocadas tarefas de manutenção somente durante horário comercial (08:00-17:00) e em dias úteis.

A Tabela 1 mostra os dados compilados das simulações do ano de 2017 das manutenções, onde fob_{out} é o valor da função objetivo de saída da solução mensal, t é o tempo de processamento da solução mensal, PVI é o valor monetário (R\$) da somatória da Parcela Variável por Indisponibilidade consumida pelas soluções diárias compiladas no mês, T_{HN} é o tempo normal de equipe de manutenção consumido e T_{HE} é o tempo extra de equipe de manutenção consumido. A Tabela 2 mostra o histórico de manutenções reais apurado no ano de 2017.

Tabela 1 – Programação Método Proposto Ano 2017

Manutenção	fob_{out}	t [s]	PVI [R\$]	T_{HN} [h]	T_{HE} [h]
CD	47418	0,5332	292.006,78	312,33	25
SD	2717	0,6228	89.552,90*	269	4,5
TNP	58	0,3515	194.571,13*	28	1,17

NOTA: *falha em equipamento; foi realizada atividade de manutenção CD em 34 equipamentos (de 48 equipamentos manuteníveis); foi realizada atividade de manutenção SD em 19 equipamentos (de 30 equipamentos manuteníveis); foi realizada atividade de manutenção TNP em 3 equipamentos (de 5 equipamentos manuteníveis).

Tabela 2 - Caso Real Ano 2017

Manutenção	fob_{out}	t [s]	PVI [R\$]	T_{HN} [h]	T_{HE} [h]
CD	4047284	***	1.817.851,08	267,58	236,79
SD	332294	***	107.043,70*	146,5	34,75
TNP	166201	***	194.571,13*	381	20,17

NOTA: *falha em equipamento; foi realizada atividade de manutenção CD em 21 equipamentos (de 48 equipamentos manuteníveis); foi realizada atividade de manutenção SD em 12 equipamentos (de 30 equipamentos manuteníveis); foi realizada atividade de manutenção em 1 equipamento (de 5 equipamentos manuteníveis).

Percebe-se, em todas as instâncias, que o valor geral de PVI utilizando método proposto foi muito menor que o caso real. Além disso, o tempo consumido pelas equipes de manutenção também foi mais racional (valendo-se mais das horas normais do que extras das equipes de manutenção). Ademais, a execução das atividades de manutenção abrangeu mais equipamentos do objeto de estudo. Portanto, as soluções encontradas pelo método resultaram em expressiva economia.

A Tabela 3 mostra os dados compilados das simulações para avaliar o desempenho do método de solução em termos a robustez computacional em um dado mês do horizonte de programação onde "Grau" denota o número máximo de equipamentos sujeitos à manutenção simultânea por período; t_{PD} denota o tempo de execução da PD sem utilização da heurística; t_{HE} denota o tempo de execução da PD com a utilização da heurística; M_{HE} denota o tempo relativo (percentual) com aplicação da heurística com base no caso sem heurística.

Tabela 3 - Desempenho do Método de Solução

Grau	t_{PD} [s]	t_{HE} [s]	M_{HE} [%]
1	0,0415	0,0017	4,0964
2	0,5472	0,0047	0,8589
3	27,4609	0,0176	0,0641
4	1.331,8	0,0803	0,0060

Em função dos resultados experimentais obtidos na Tabela 3, pode-se dizer que a combinação da heurística construtiva desenvolvida com a Programação Dinâmica pode contribuir de maneira a agregar vantagens práticas em relação à racionalização efetiva dos recursos computacionais envolvidos na resolução do problema de programação de manutenção dos equipamentos de transmissão do Setor Elétrico Brasileiro. No entanto, verificou-

se que o problema de programação de manutenção do objeto do estudo mostrou-se na prática bem folgado apresentando dificuldade de resolução (conflitos de escolha) baixa em praticamente todo o calendário de programação.

5.2 Caso Simulado

O objetivo desta seção é apresentar e descrever os resultados alcançados para avaliação do método desenvolvido nesta pesquisa nos quesitos resolução de conflitos e qualidade de solução para problemas menos folgados que o caso real apresentado. Como objeto de pesquisa foi adotada uma subestação fictícia discretizada em 98 equipamentos. Para abastecer o banco de dados foram utilizadas informações de equipamentos reais com tempos de vida útil convenientemente manipulados para alcançar no primeiro semestre do ano vigente de teste (2017), ao menos, 10 equipamentos em manutenção por mês e no segundo semestre, ao menos, 15 equipamentos em manutenção por mês. Foram mantidas as mesmas hipóteses simplificadoras do caso real e desenvolvidas simulações somente para manutenções com desligamento (caso com 48 equipamentos manuteníveis).

A Tabela 4 mostra os dados compilados das simulações diárias em base mensal do ano de 2017, onde fob_{out} é o valor da função objetivo de saída da solução mensal, t é o tempo de processamento da solução mensal, $\sum J$ número de equipamentos que sofreram manutenção no mês corrente, $\sum D$ é a quantidade de dias uteis para execução do calendário de programação no mês.

Tabela 4 – Resultados Simulação CD 2017

Mês	fob_{out}	t [s]	$\sum J$	$\sum D$ [dias]
01	47418	0,0386	15	22
02	0	0,0552	10	18
03	0	0,0751	11	22
04	0	0,0388	11	18
05	0	0,0612	11	22
06	0	0,0551	14	20
07	5	0,0379	17	21
08	0	0,0559	17	23
09	4	0,0860	18	19
10	0	0,0410	17	20
11	301	0,0356	18	18
12	0	0,0372	17	20
total	47728	0,6176	176	243

Pode-se verificar por todas as instâncias apresentadas a robustez, a eficiência e a eficácia da metodologia utilizada, pois a mesma encontrou as soluções que proporcionaram uma distribuição racional e concatenada na janela de programação das atividades de manutenção. Nota-se que o valor da função objetivo em praticamente todo o calendário de programação foi muito próximo do zero o que denota a grande qualidade (otimalidade na maioria dos meses) das soluções encontradas.

6.0 - CONCLUSÕES

Em todo processo de planejamento, em especial aqueles que envolvem decisões em sistemas estratégicos, o decisor precisa incluir uma etapa de acompanhamento e avaliação dos resultados, visando corrigir eventuais desvios dos objetivos, imprecisão nos modelos, ou para tirar proveito de novas oportunidades. A solução do problema está relacionada ao gerenciamento do ciclo de vida dos equipamentos bem como o ajuste no das decisões diárias tomadas para a gestão dos recursos logísticos de manutenção. Desta forma, é necessário definir medidas em termos de recursos relacionados à atividade manutenção (custos, horas de equipes aplicadas, disponibilidade etc) para avaliar de maneira objetiva os dados experimentais obtidos. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta apresentou melhoria relativa significativa em todos os casos e aspectos avaliados. Todos os procedimentos de teste efetuados evidenciam que as boas soluções não precisam necessariamente consumir mais recursos para serem alcançadas. Os testes também demonstraram de maneira inequívoca grande viabilidade de se implementar os procedimentos da método a problemas reais. A metodologia proposta solucionou muito bem o problema de programação de manutenção do objetivo de estudo. Em função dos resultados experimentais obtidos, pode-se dizer que a metodologia proposta está apta para solucionar problemas de qualquer vulto relacionados à programação da manutenção dos equipamentos de transmissão do Setor Elétrico Brasileiro.

Segundo (1), validar um modelo consiste na confirmação de sua capacidade de reprodução do comportamento do sistema modelado. A validação resume-se em submeter o sistema modelado e o modelo ao mesmo conjunto de sinais externos, e comparar os resultados obtidos. Foi impraticável, por questões diversas, submeter o processo de

manutenção a experimentos deste porte, os quais levariam anos para produzir resultados. Entretanto, pôde-se analisar o desempenho do sistema em um período de tempo passado, para o qual se conhecia os sinais externos, e simular o modelo com os mesmos sinais. Então, a confirmação do modelo/implementação pôde ser comprovada pelo comportamento da função objetivo nos diversos casos abordados em contraste ao caso real. Todos os procedimentos de teste efetuados evidenciam, de maneira muito clara, que as boas soluções, ou seja, aquelas que consumiram os recursos de maneira mais racional, com melhor distribuição na janela de programação associadas e com melhores índices de confiabilidade dos equipamentos, apresentaram o menor valor de função objetivo. Isto confirma a boa representação pelo modelo da relação entre confiabilidade e utilização dos recursos da atividade de manutenção. Observa-se nas soluções encontradas que os cronogramas obtidos apresentaram uma alocação de manutenções dos equipamentos ao longo do tempo bastante coerente, mostrando a capacidade que o modelo possui para bem representar matematicamente os conflitos existentes e ser instrumento para otimizar, de maneira consistente os planos de manutenção. Atesta-se, assim, a eficácia do mesmo como importante ferramenta de decisão para programação de manutenção.

Em todas as instâncias avaliadas a combinação da Heurística Construtiva/Programação Dinâmica se mostrou extremamente eficiente apresentando melhoria significativa de qualidade em relação às soluções aplicadas na prática (caso real), pois encontrou as soluções que consumiram os recursos necessários e suficientes para uma distribuição racional e concatenada na janela de programação das atividades de manutenção e assim apresentado a melhor relação custo/confiabilidade dos ativos de transmissão estudados. Por outro lado, seu custo computacional mostrou ser extremamente baixo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J.E. Araujo Neto, 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
- (2) F.E.L Pereira, Determinação do intervalo de manutenção programada da proteção de linhas de transmissão considerando-se penalidades associadas à indisponibilidade, PUC, 2001
- (3) F.T.M. Abraão, 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, 2006
- (4) J.E. Araujo Neto, A.C. Moretti e C.A. Castro, "Transmission asset maintenance programming optimization – the Brazilian electric system case", IEEE Latin America Transactions, pp. 1414-1420, Maio de 2015

8.0 - 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 1960 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.