SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GMI - 05
16-21 de Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO XII
GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS - GMI

PROGRAMAÇÃO ÓTIMA DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE UNIDADES GERADORAS UTILIZANDO RELAXAÇÃO LAGRANGEANA

Erlon Cristian Finardi * Hans Helmut Zürn

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

René Francisco Sauer Lauro Fernando Castro Bertuol Carlos Alberto Schmitt

TRACTEBEL ENERGIA S.A.

RESUMO

Este artigo é resultado de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D realizado por uma parceria entre a UFSC e a Tractebel Energia S.A., cujo tema principal é a programação ótima da manutenção preventiva de unidades geradoras hidrelétricas e termelétricas. A programação é um importante problema que deve ser realizado por um agente, no sentido de evitar a degradação, bem como minimizar a probabilidade de saída forçada dos seus ativos de geração. Dado que as estratégias comerciais do agente são afetadas pela manutenção das unidades, modelos matemáticos direcionados para encontrar uma escala de manutenção otimizada podem adiar investimentos necessários em novas unidades geradoras, alongando a vida útil dos equipamentos. Matematicamente, o problema de otimização resultante dessa atividade é de difícil solução devido, especialmente, à presença de variáveis binárias e restrições acopladas no tempo e no espaço. Esse trabalho apresenta uma estratégia de solução, baseada nos conceitos da Relaxação Lagrangeana, que visa solucionar de modo eficiente o problema da manutenção preventiva. O desempenho do modelo é demonstrado a partir dos resultados e dos tempos computacionais obtidos na solução do programa anual de manutenção das unidades da Tractebel. O modelo pode servir como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para evitar a degradação dos seus ativos de geração do agente, bem como minimizar a probabilidade de saída forçada desses equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção Preventiva, Sistemas Hidrotérmicos, Relaxação Lagrangeana, Planos Cortantes.

1.0 - INTRODUÇÃO

O problema da programação ótima da manutenção preventiva de unidades geradoras visa determinar o melhor período de parada de cada unidade geradora para realizar a manutenção preventiva, isto é, as chamadas grandes paradas de máquina. As pequenas paradas são normalmente efetuadas em fins de semana, bem como à noite, quando a demanda naturalmente é reduzida.

A importância de realizar a otimização da manutenção deve-se ao fato que a confiabilidade e os custos de operação do sistema são diretamente afetados pelas retiradas de operação das unidades geradoras. Portanto, uma escala de manutenção especialmente otimizada pode, em potencial, adiar algum investimento necessário em novas unidades geradoras.

As restrições comumente encontradas neste tipo de problema são: periodicidade da manutenção, períodos proibidos, disponibilidade de recursos humanos e materiais, não-simultaneidade da manutenção de certas unidades geradoras, preservação de capacidade de geração localizada, restrições hidrológicas e ambientais, entre outras. No tocante à função objetivo, pode-se atender a um único critério, ou a uma combinação de objetivos

* **LabPlan/EEL/CTC - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC Trindade / Caixa Postal: 476 - Florianópolis/SC - 88040-900 Fone: PABX (+55 48) 331-9731 / FAX: (+55 48) 331-7538 - e-mail: erlon@labplan.ufsc.br**

como, por exemplo, nivelar a disponibilidade de geração do parque gerador ao longo do horizonte de estudo, minimizar os custos de geração envolvidos, maximizar a energia produzida, minimizar o desvio em relação a uma escala pré-fornecida, entre outros.
Foi na década de setenta que o problema da programação ótima da manutenção preventiva de unidades geradoras despertou maior interesse, especialmente após a publicação do trabalho pioneiro de Christiaanse e Palmer (1). Desde então, os métodos para solucionar o problema são baseados em heurísticas, técnicas de programação matemática, ou ainda, uma combinação de ambas.
Métodos heurísticos, em geral, terminam o processo de busca quando uma escala de manutenção viável é encontrada. Em geral, podem falhar em alcançar uma solução viável ou, ainda, encontram soluções muito afastadas de um ponto ótimo. Heurísticas estão presentes no trabalho citado acima. Os autores fazem uso de uma heurística do tipo *Branch and Bound* como procedimento de solução. A idéia é realizar uma pré-ordenação por equipes de manutenção, sendo que as unidades das equipes que tiverem o maior produto de potência com os períodos necessários para realizar a manutenção têm preferência sobre as demais. Por sua vez, Patton e Ali (2) realizam uma ordenação dinâmica, onde são feitos testes para determinar qual unidade ainda não escalada causa o maior acréscimo na probabilidade de perda de carga ao entrar na manutenção.
No tocante a trabalhos que fazem uso de técnicas de programação matemática, Dopazo e Merrill (3) sugerem o uso da Programação Inteira-Mista - PIM como metodologia de solução. Este método pode obter uma solução ótima local; entretanto, é necessário que o problema seja representado por um modelo linear. Uma das desvantagens do uso da PIM é que o tempo de solução cresce exponencialmente com o número de variáveis; isso leva a tempos excessivamente elevados para sistemas de grande porte. Para amenizar este fato, Kohli et al. (4) sugeriram uma pré-ordenação das variáveis, por unidade geradora, segundo coeficientes de custo crescentes. Neste caso, existe a redução do universo de soluções a serem investigadas, desde que uma solução viável seja logo encontrada.
A Programação Dinâmica - PD por aproximações sucessivas foi utilizada por Zürn e Quintana (5), (6). Esta técnica permite escalar a manutenção sucessivamente de grupos de unidades geradoras com características semelhantes de potência, mas não necessariamente com os mesmos requisitos de manutenção. Para cada grupo é obtida uma escala ótima, considerando a atual configuração de escala de manutenção do resto do sistema. Como vantagem da metodologia adotada, tem-se que qualquer modelo linear ou não-linear pode ser utilizado, não existindo restrição com relação ao tipo de função objetivo e de restrições. Entretanto, o método pode garantir apenas soluções sub-ótimas. Interessante análise é realizada em (6), onde diversos objetivos são investigados: mínimo custo de geração, maximização de disponibilidade, nivelamento da capacidade de reserva, entre outros. Em trabalho mais recente, Yamayee et al. (7) usam também a técnica da PD por aproximações sucessivas em um problema multi-critério onde se deve considerar simultaneamente a confiabilidade e o custo de produção de energia.
A partir da década de 80 surgiram esforços para estender as técnicas existentes considerando o aspecto ligado à presença de áreas interligadas. Um dos primeiros trabalhos é atribuído a El-Sheikhi e Billinton (8), onde é proposto um método probabilístico para escalonar a manutenção de dois sistemas interligados, com base num critério de nivelamento de confiabilidade. Por sua vez, Silva et al. (9) abordam o problema da programação da manutenção incluindo restrições de transmissão e de seus respectivos modos de falhas. Técnicas de decomposição de Benders e de *Branch and Bound* são usadas num esquema onde o objetivo consiste em dividir o problema em duas partes: um problema de avaliação (mestre) e um problema de alocação (escravo). Muñoz e Ramos (10) também resolvem o problema pela divisão em dois estágios, só que utilizam a programação por objetivo (Goal Programming). González e Juan (11) propõem um método de nivelamento da confiabilidade em sistemas com grandes usinas hidrelétricas em que o problema da programação da manutenção está inserido. Para tal se valem de uma busca heurística. Finalmente, Leon (12) apresenta uma programação flexível de manutenção de unidades geradoras considerando incertezas, valendo-se da programação 0-1 nebulosa.
O principal objetivo deste trabalho consiste em apresentar um algoritmo de otimização para resolver o problema da programação ótima da manutenção preventiva de unidades geradoras baseado na metodologia da Relaxação Lagrangeana (13). Nenhum trabalho prévio que tenhamos conhecimento faz uso da RL como estratégia de solução, sendo que este artigo apresenta um enfoque novo de solução ao problema, bem como oferece significativa contribuição técnica ao assunto da manutenção preventiva.
A RL tem sido aplicada com sucesso em problemas com características matemáticas semelhantes ao da programação da manutenção como, por exemplo, o problema da alocação de unidades geradoras termelétricas (14) (em inglês, thermal unit commitment). A aproximação ‘dividir para conquistar’ usada pela RL, também definida como decomposição por preços, é bem conhecida. Basicamente, as restrições que acoplam muitas variáveis são relaxadas via multiplicadores de Lagrange, sendo que o correspondente problema dual é de natureza separável, isto é, pode ser resolvido por meio da soma de subproblemas menores e mais simples (denominados comumente de subproblemas locais). A coordenação das soluções obtidas nesses subproblemas é feita então por um programa ‘mestre’ que realiza a otimização (maximização) de uma função tipicamente não-diferenciável – função dual, no sentido de atualizar os multiplicadores.
Para que esse esquema de solução seja eficiente, o gap de dualidade resultante[1], que é a medida da violação das restrições dualizadas, deve ser o menor possível. Basicamente, dois aspectos contribuem para encontrar um

[1] Para problemas convexos o gap de dualidade, que é dado pela diferença entre o máximo valor da função dual e o mínimo valor

pequeno gap de dualidade. Primeiro, os subproblemas locais devem ser resolvidos de maneira eficiente, ou seja, é importante que os mesmo sejam de fácil solução ou sejam adequados para que algoritmos robustos possam ser utilizados. Esta tarefa requer uma escolha cuidadosa de quais grupos de restrições devem ser relaxadas. Por sua vez, o segundo aspecto que contribui para um pequeno gap de dualidade refere-se ao procedimento de atualização dos multiplicadores de Lagrange, isto é, a maximização da função dual. Essa função é tipicamente não-diferenciável e, portanto, sua otimização não é uma tarefa trivial, desde que os critérios de parada comumente adotados para funções de natureza não-diferenciável não podem ser usados. Outras características complexas ligadas com a otimização não-diferenciável podem ser vistas em (15).
Existem diversas maneiras de maximizar a função dual. Um estudo desse universo de possibilidades, relacionado especificamente com a RL, é apresentado na Referência (16). A técnica mais usada é a do Subgradiente (15), a qual é ineficiente computacionalmente devido a problemas de convergência oscilatória e um complicado critério de parada associado. Métodos tais como os Planos Cortantes (15) e dos Feixes (17) sobrepujam essas desvantagens presentes no algoritmo do Subgradiente. O preço a pagar está na complexidade da atualização dos multiplicadores. No caso dos Planos Cortantes a atualização é obtida por meio da solução de um problema de Programação Linear (PL). Por sua vez, no método dos Feixes o mesmo objetivo é alcançado resolvendo-se um problema de Programação Quadrática (PQ), em cada iteração dual. Essa complexidade adicional, entretanto, torna o método dos Feixes mais estável que os Planos Cortantes. Todavia, no método dos Feixes é necessário ajustar um parâmetro de penalidade que depende da estrutura do problema e, adicionalmente, o método em si possui difícil implementação computacional quando comparado aos Planos Cortantes. Neste trabalho um algoritmo baseado no método dos Planos Cortantes é usado de modo a evitar a ineficiência do Subgradiente e a complexidade dos Feixes.
Este trabalho está organizado da seguinte maneira. Na próxima seção é apresentada a formulação matemática do problema de interesse deste trabalho. Por sua vez, a Seção 3 aborda a estratégia de solução. Na seqüência, essa estratégia é aplicada a uma configuração hidrotérmica para determinar uma escala ótima da programação da manutenção das unidades. O artigo se encerra com a seção de conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2.0 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Matematicamente, o problema de otimização de interesse deste trabalho é dado por:

$$\text{minimize } f = \sum_{i=1}^{I} \rho_i (b_i - B_i)^2 \qquad (1)$$

$$u_{it} = 0 \text{ para } t < e_i \text{ e } t > l_i \text{ , } i = 1,I$$
$$u_{it} = \begin{cases} 1 & b_i \le t \le b_i + d_i - 1 \\ 0 \text{ ou } 1 & e_i \le t \le l_i \end{cases} \text{ , } i = 1,I$$
Períodos proibidos, janelas, duração e ininterrupção da manutenção, (2)

$$\sum_{t=1}^{T} u_{it} = d_i, \quad i = 1,I$$
Realização da manutenção uma única vez ao longo do período de estudo, (3)

$$\sum_{i=1}^{I} u_{it} \le 1, \quad t = 1,T$$
Restrição de equipe de manutenção. (4)

onde:

f	é o valor da função objetivo do problema;
I	é o total de unidades geradoras de um agente;
i	é o índice associado às unidades geradoras, tal que i=1,I;
T	é o total de estágios de tempo referente ao estudo da manutenção;
t	é o índice associado aos estágios de tempo, tal que t=1,T;
u_{it}	variável binária que indica o estado da unidade i ao longo do estágio de tempo t. Se u_{it} = 1, então a unidade i deve estar em manutenção no estágio de tempo t. Caso contrário, isto é, u_{it} = 0, então essa unidade deve permanecer disponível à operação no referido estágio;
ρ_{it}	constante que representa uma penalidade para o desvio em relação ao programa de manutenção ideal da unidade i ao longo do estágio de tempo t. Essas constantes podem ser adequadas de acordo com o nível de flexibilidade permitido para uma dada unidade geradora – levemente flexível, muito flexível, entre outros níveis;
e_i	período inicial da janela no qual é permitida a manutenção da i-ésima unidade geradora;
l_i	período final da janela no qual é permitida a manutenção da i-ésima unidade geradora;
b_i	representa o período no qual a manutenção é iniciada na i-ésima unidade;
B_i	variável que indica o período inicial fornecido na escala ideal na qual a unidade i deve entrar em manutenção;

---

viável para o problema primal, é sempre igual a zero. No caso de problemas não-convexos, conforme é o caso da manutenção preventiva, a ausência do gap de dualidade não pode ser assegurada.

d_i representa o número mínimo de estágios de tempo necessário para realizar a manutenção da *i*-ésima unidade;

Na formulação acima a Função Objetivo (1) visa obter um mínimo desvio em relação a uma escala ideal pré-definida. Esta escala segue, em geral, uma periodicidade que pode ser sugerida pelos fabricantes dos equipamentos, ou oriunda da experiência adquirida pelo pessoal diretamente envolvido com a manutenção. Outra importante aplicação deste critério está na revisão de uma programação já existente, a qual não pode continuar sendo utilizada devido ao aparecimento de novos eventos como, por exemplo, variações nos dados de demanda ou ainda, contingências imprevistas no sistema de geração. Deste modo, o critério de mínimo desvio ajuda a obter uma programação atualizada para o restante do intervalo de estudo com um mínimo número de alterações em relação ao programa de manutenções anteriormente definido, satisfazendo ainda as restrições impostas.

O conjunto de restrições definido por (2) representa os períodos proibidos, janelas, duração e ininterrupção da manutenção. As restrições presentes em (3) servem para as unidades que não devem realizar as respectivas manutenções mais de uma vez no horizonte de planejamento. A incompatibilidade existente entre realizar a manutenção de forma simultânea de um determinado grupo de unidades geradoras é verificada a partir das restrições (4).

Matematicamente falando, as restrições têm distintas características de acoplamento temporal ou espacial. As unidades geradoras sujeitas às restrições de acoplamento espacial têm suas saídas para manutenção diretamente relacionadas entre si. As restrições com acoplamento temporal atuam sobre cada unidade isoladamente ao longo dos estágios de tempo. Nesse sentido, com base na estrutura do Problema (1)-(4), algumas considerações podem ser feitas. As restrições (2)-(3) são desacopladas por unidade, isto é, existe a presença de variáveis de uma única unidade geradora. Neste caso não existe a presença de acoplamento espacial; porém as mesmas possuem acoplamento temporal. Por sua vez, as restrições (4) apresentam somente acoplamento espacial, isto é, entre diversas unidades geradoras em um dado estágio de tempo.

Na próxima seção é apresentada a estratégia de solução utilizada neste trabalho para resolver o problema de otimização, a qual é baseada nos conceitos da RL e visa explorar a estrutura matemática especial apresentada nesta seção.

3.0 - ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Vamos a partir de agora ver como a RL opera na busca da solução do problema da manutenção. Inicialmente, na RL as restrições ligadas com as equipes de manutenção (4) são relaxadas por meio do uso dos multiplicadores de Lagrange, λ_t, que dão origem ao seguinte problema dual:

$$\underset{\lambda_t}{\text{maximize}}\ \theta(\lambda_t) = \text{maximize}\left(\sum_{i=1}^{I} \Psi_i(\lambda_t) - \sum_{t=1}^{T} \lambda_t\right) = \text{maximize} \sum_{i=1}^{I} \Psi_i(\lambda_t) - \text{maximize} \sum_{t=1}^{T} \lambda_t \qquad (5)$$

Acima, o objetivo consiste em encontrar um valor para o vetor de multiplicadores de Lagrange, λ_t, que maximize a função $\theta(\lambda_t)$. A maximização dessa função será realizada com base em duas informações: o valor de $\theta(\lambda_t)$ e do vetor de subgradientes, $sg(\lambda_t)$, ambos calculados para um determinado λ_t. O vetor $sg(\lambda_t)$ possui a informação de subida de $\theta(\lambda_t)$ e é composto pelo valor das restrições relaxadas (4). O algoritmo que maximiza $\theta(\lambda_t)$ é detalhado ainda nessa seção. Antes, porém, é necessário mostrar como são calculadas as soluções dos subproblemas primais associados com a decomposição empregada. Nesse sentido, observe a Função Dual (5). É possível perceber que a mesma pode ser calculada por meio da resolução de *I* subproblemas de otimização independentes, cuja estrutura matemática é mostrada abaixo.

$$\Psi_i(\lambda_t) = \text{minimize}\left(\rho_i (b_i - B_i)^2 + \sum_{t=1}^{T} \lambda_t u_{it}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a:}\quad & u_{it} = 0 \ \text{ para } \ t < e_i \ \text{ e } \ t > l_i \\ & u_{it} = \begin{cases} 1 & b_i \le t \le b_i + d_i - 1 \\ 0 \text{ ou } 1 & e_i \le t \le l_i \end{cases} \qquad i \text{ fixo} \\ & \sum_{t=e_i}^{l_i} u_{it} = d_i \end{aligned} \qquad (6)$$

A solução ótima do subproblema acima é encontrada calculando-se o custo de cada combinação viável da *i*-ésima unidade geradora, onde o número de combinações viáveis é dado por T-d_i+1 conforme ilustra a figura a seguir.

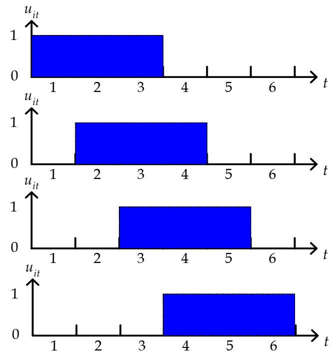


FIGURA 1 – Total de combinações viáveis para um subproblema local onde T = 6 e di = 3.

Conforme visto, a Função Dual (5) é definida pela soma de subproblemas de minimização, os quais são funções lineares dos multiplicadores de Lagrange, λ_t. Em conseqüência, a função dual é côncava. Outra característica importante diz respeito a diferenciabilidade dessa função. Em geral, não existe derivada em todos os valores de λ_t uma vez que os vários segmentos lineares que compõem essa função usualmente se interligam com inclinações diferentes.

É importante notar que, em cada iteração dual, apenas duas informações estão disponíveis para cada λ_t: o valor da função dual, $\theta(\lambda_t)$, e um vetor qualquer de subgradientes, $sg(\lambda_t)$. A definição matemática desse vetor, o qual representa um conceito genérico de gradiente para uma função qualquer é vista abaixo.

$$\theta(\lambda_t) \le \theta(\lambda_t^0) + (\lambda_t - \lambda_t^0)^t sg(\lambda_t^0) \qquad (7)$$

No método dos Planos Cortantes, a partir do cálculo da função dual e de um respectivo subgradiente, pode-se construir um modelo da função dual que seja fácil de realizar sua minimização. Deste modo, pode-se então definir um modelo côncavo e linear por partes da função dual:

$$\theta^{it}(\lambda_t) = \min_{it=1,\ldots,it^{max}} \{\theta^{it}(\lambda_t^{it}) + (\lambda_t - \lambda_t^{it})^t sg^{it}(\lambda_t)\} \qquad (8)$$

O método define, a cada iteração it, um novo valor de λ_t por meio da solução de um problema de PL, que visa maximizar $\theta^{it}(\lambda_t)$. O procedimento de parada deste algoritmo é definido, tipicamente, com base em limites construídos a partir do Modelo (8) e da avaliação da função dual em λ_t^{it}.

4.0 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Nesta seção serão apresentados os principais resultados obtidos pelo modelo de otimização desenvolvido. O sistema hidrotérmico que forneceu os dados para os estudos possui um total de 39 unidades geradoras, com 16 termelétricas e 23 hidrelétricas. Doze usinas compõem o sistema, onde seis são termelétricas e seis hidrelétricas. A distribuição espacial dessas unidades nas usinas é a seguinte: uma usina tem apenas uma unidade; duas usinas têm duas unidades; três usinas têm três unidades; três usinas têm quatro unidades; uma usina tem cinco unidades e uma usina tem seis unidades.Todas as unidades termelétricas estão sob o encargo de uma equipe de manutenção. Por sua vez, duas equipes estão divididas na manutenção das unidades hidrelétricas. Uma equipe fica com a tarefa de operar 13 unidades e a outra 10. A duração da manutenção das unidades do sistema varia entre um mínimo da quatro dias até uma duração máxima de 60 dias. Os resultados estão apresentados em três grupos de unidades geradoras. O primeiro grupo possui as 9 UTEs, sendo denominado aqui de T1. Os outros dois grupos referem-se às UHEs. 13 unidades compõem o grupo H1 e 10 formam o grupo H2. A Figura 2, ilustrada na Seção 4.1 adiante, mostra características adicionais das unidades do sistema como, por exemplo, a duração da manutenção. A divisão em grupos é decorrente da estrutura das restrições de equipe, isto é, cada grupo tem uma equipe responsável para realizar a manutenção. Deste modo, tem-se um Problema (1)-(4) para cada grupo isoladamente. O horizonte de estudo utilizado foi de 48 estágios, discretizado semanalmente, sendo que o período inicial considerado é o mês de fevereiro de 2004. Diversos testes foram realizados, os quais basicamente diferem entre si pelos pesos atribuídos à função objetivo do problema. Basicamente, os principais resultados de saída do modelo apresentados aqui são o valor ótimo do problema, a escala final e o número de iterações. No tocante aos aspectos computacionais, o modelo foi implementado em linguagem Matlab®, sendo que os testes foram realizados em um microcomputador AMD Athlon XP2400+, com 512 Mbytes de memória RAM.

4.1 Caso 1

Neste primeiro caso, a escala inicial utilizada para determinar o mínimo desvio é aquela fornecida pelo agente, presente no programa anual de parada de unidades termelétricas e hidrelétricas de 2004, presente na Figura 2.
Todos os pesos da função objetivo do modelo de otimização são iguais a um para todos os grupos: T1, H1 e H2. Conforme mostrado na seqüência, o modelo fornece uma escala ótima de boa qualidade.

FIGURA 2 – Escalas Iniciais do Caso 1.

A Tabela 1 mostra alguns importantes parâmetros ligados ao desempenho computacional. O tempo computacional médio total, isto é, aquele necessário para otimizar todos os três grupos independentemente foi igual a 1 minuto.

TABELA 1 – Desempenho Computacional do Caso 1.

Problema	T1	H1	H2
Iterações	175	-	11
Valor da Função Dual	92	-	1
Valor Ótimo Primal	92	-	1
Norma do Subgradiente	0	-	0

Inicialmente é importante notar os resultados apresentados para H1. Dado que a escala inicial fornecida para as unidades é viável, nenhum procedimento de cálculo se faz necessário. Entretanto, a viabilidade, porém, não ocorre com os demais grupos T1 e H2, conforme pode ser visto na Figura 2. Ainda na Tabela 1 é possível observar que a solução dos problemas primal e dual são idênticas, isto é, não existiu um *gap* de dualidade. A conseqüência é que essas soluções primais, ou seja, a escala final otimizada, é viável, conforme pode ser visto pela norma do vetor de subgradientes. As próximas figuras mostram a escala ótima de manutenção fornecida para os grupos T1 e H2.

(a) (b)

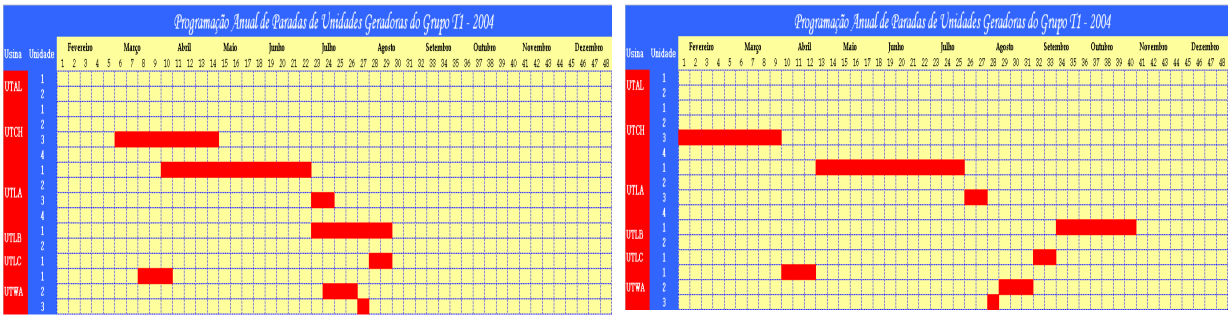
FIGURA 3 – Escalas Ótimas do Caso 1 Relativas aos Grupos T1 (a) e H2 (b).

Comparando os resultados acima com a escala inicial mostrada na Figura 2 é possível observar como o modelo desenvolvido encontra uma escala de mínimo desvio em relação a escala original. A Unidade UTCH3 na escala inicial tem sua manutenção prevista para a quinta semana. No final do processo iterativo, a manutenção dessa unidade foi adiantada em quatro semanas. Por sua vez, a Unidade UTWA1 teve sua manutenção postergada da sétima para a décima semana. Postergada também foi a manutenção da Unidade UTLA1, da décima, para a décima terceira semana. Em resumo, exceto a manutenção prevista para a Unidade UTLA3, todas as demais unidades tiveram modificações em relação à escala inicial fornecida.

Agora com relação a Figura 3(b), é possível observar a escala ótima de manutenção fornecida para o grupo H2. Com o apoio da Figura 2, pode ser visto que somente uma unidade teve sua manutenção alterada em relação à escala inicial.

4.2 Caso 2

Neste teste a escala inicial de T1 é modificada de modo que as manutenções estejam concentradas em um determinado conjunto de estágios de tempo. Do mesmo modo que o teste anterior, todos os pesos da função objetivo de cada caso são iguais a um. As escalas inicial e final são mostradas na figura a seguir.



(a) (b)

FIGURA 4 – Escalas Inicial (a) e Final (b) do Caso 2 Referente ao Grupo T1.

O algoritmo alcançou uma solução ótima viável em 253 iterações, e um tempo de execução de 1 minuto. O valor ótimo dos problemas dual e primal são iguais a 210.

Diversos testes adicionais foram realizados. Por exemplo, verificou-se que é possível para manter fixa a manutenção de uma unidade mediante o incremento do respectivo peso associado na função objetivo. O efeito de adiantamento e postergação pode ser alcançado fazendo uso de pesos negativos. Portanto, o controle dos pesos da função objetivo pode ser uma ferramenta eficaz para dar prioridades de manutenção entre as unidades geradoras.

Outro resultado não menos importante verificado nos testes diz respeito a diferença entre as soluções obtidas pelo problemas primal e dual. A abordagem tratada aqui, diz respeito à solução de um problema dual, que por sua vez é uma versão relaxada do problema primal original. Em determinados casos[2], algumas restrições são violadas na solução ótima dual, de modo que é necessário fazer uma “purificação” das soluções primais obtidas. A esta purificação do processo de solução dá-se o nome de recuperação primal. O processo de purificação é baseado em heurísticas, as quais dependem fortemente da estrutura de um problema em particular. Diversas heurísticas têm sido utilizadas para os mais diferentes problemas. Todavia, é importante lembrar que o problema da manutenção possui características peculiares que podem requerer o uso de heurísticas próprias, as quais não necessariamente representam uma aplicação direta, ou até mesmo parcial, daquelas encontradas na literatura. No caso do presente trabalho, para se obter uma solução viável, o ajuste dos pesos da função objetivo também foi utilizado, tendo como ponto de partida uma escala inicial pré-otimizada (e inviável) com pesos unitários. Os melhores resultados foram obtidos ajustando-se os pesos proporcionais ao produto entre a potência pela duração de manutenção das unidades.

Por fim, a título de ilustração, a Figura 5 mostra uma das saídas gráficas do modelo de otimização desenvolvido. Nessa figura é possível observar a evolução, ao longo das iterações, do valor da função dual, da norma do vetor de subgradientes e da função objetivo primal.

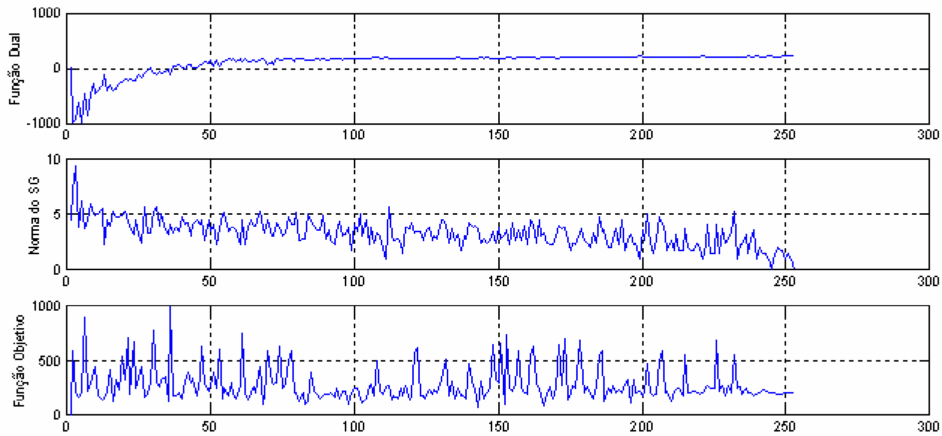


FIGURA 5 – Saída Gráfica do Modelo de Otimização.

[2] Os grupos H1 e H2 foram aqueles que mais necessitaram de uma recuperação primal. As durações de manutenção muito semelhantes das unidades hidrelétricas contribuem para que a decomposição empregada não encontre uma solução primal viável com base nos multiplicadores ótimos encontrados na maximização do problema.

5.0 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo teve como tema principal o problema da programação ótima da manutenção preventiva de unidades geradoras. A concepção de um algoritmo – estrutura de modelo, que minimiza os desvios em relação à uma escala fornecida sujeito a uma série de restrições foi apresentado. A estrutura computacional permite ao agente um avanço na qualidade dos serviços realizados no que tange à manutenção preventiva dos seus ativos de geração, no sentido de evitar a degradação operativa, bem como minimização da probabilidade de saídas forçadas das unidades geradoras. Como desenvolvimentos futuros, existe espaço para uma série de aperfeiçoamentos para o modelo desenvolvido. Por exemplo, pode-se incrementar o número de estágios de estudo, implementar um procedimento de recuperação primal mais sofisticado e incluir custos diferenciados para o adiantamento e postergação da manutenção das unidades. Além disso, é importante desenvolver um modelo mais complexo que leve em consideração o 'tradeoff' entre os ganhos de curto prazo e a permanente degradação da performance operativa no longo prazo, englobando as diretrizes das decisões de geração num ambiente de mercado (preços spot, contratos bilaterais) com aquelas ligadas à manutenção (restrições de equipes, duração, etc.).

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Christiaanse, W. R., Palmer, A. H. A Technique for the Automated Scheduling of the Maintenance for Generating Facilities, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Volume PAS-91, Number 1, Jan-Feb 1972, pp. 137-144.

(2) Patton, A. D., ALI, J. Comparison of Methods for Generator Maintenance Scheduling, Paper C72 452-1, *IEEE Summer Power Meeting*, July 1972.

(3) Dopazo, J. F., Merrill, H. M. Optimal Generator Maintenance Scheduling Using Integer Programming, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Volume PAS-94, Number 5, Sept-Oct 1975, pp. 1537-1545.

(4) Kohli, J. C., Sharma, J., Dave, M. P. Optimal Preventive and Corrective Maintenance Scheduling in Power Systems – Models and Techniques of Analysis", Paper C75 146-6, *IEEE Winter Power Meeting*, January 1975.

(5) Zürn H. H., Quintana, V. H. Generator Maintenance Scheduling Via Successive Approximations Dynamic Programming, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Volume PAS-94, Number 2, Mar-Apr. 1975, pp. 665-671.

(6) Zürn H. H., Quintana, V. H.; "Several Objective Criteria for Optimal Preventive Maintenance Scheduling", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Volume PAS-96, Number 3, May-Jun. 1977, pp. 984-992.

(7) Yamayee, Z. A., Sidenblad K., Yoshimura, M.; "A Computationally Efficient Optimal Maintenance Scheduling Method", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Volume PAS-102, Number 2, Feb. 1983, pp. 330-338.

(8) El-Sheikhi, F. A., Billinton, R.; "Generating Unit Maintenance Scheduling for Single and Two Interconnected Systems", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS 103, Number 5, May 1984.

(9) Silva, E. L., Filho, M. M., Fonseca, L .G. S., Oliveira, G. C., Melo, A. C. G., Mello, J. C. O. Transmission Constrained Maintenance Scheduling of Generating Units: a Stochastic Programming Approach*, IEEE Trans. on Power Systems*, Volume 10, Number 2, May 1995, pp. 695-701.

(10) González, C., Juan, J. Leveling Reliability in Systems with Large Hydro Resources, *IEEE Trans. on Power Systems*, Volume 14, Number 1, Feb. 1999, pp. 23-28.

(11) Moro, L. M., Ramos, A. Goal Programming Approach to Maintenance Scheduling of Generating Units in Large Scale Power Systems, *IEEE Trans. on Power Systems*, Volume 14, Number 3, August 1999, pp. 1021-1028.

(12) Leon, R. C. A Flexible Unit Maintenance Scheduling Considering Uncertainties, *IEEE Trans. on Power Systems*, Volume 10, Number 2, May 1995, pp. 695-701.

(13) Bertsekas, D. P. *Nonlinear Programming*, Athena Scientific, 2nd Edition, Belmont, MA, 1999.

(14) Sheble G. B. and Fahd G. N. Unit Commitment Literature Synopsis, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 9, Number 1, February, 1994.

(15) Bonnans, J. F., Gilbert, J. C., Lemaréchal, C., Sagastizábal, C. *Numerical Optimization. Theoretical and Practical Aspects*, Universitext, Springer-Verlag, Berlin, 2002.

(16) Bazaara, M. S., Goode, J. J.. A Survey of Various Tactics for Generating Lagrangian Multipliers in the Context of Lagrangian Duality, Eur. Journal of Op. Res., Volume 3, pp. 322-338, 1979.

(17) Lemaréchal, C., Sagastizábal, C. Variable Metric Bundle Methods: From Conceptual to Implementable Forms, Mathematical Programming (76), pp. 393-410, 1997.