

Despacho Hidrotérmico-Eólico Ótimo Por Método de Pontos Interiores

Ronaldo R. B. de Aquino, Geraldo L. Torres, Milde M. S. Lira, Vicente R. Simoni, Janise B. Silva, Hugo

T. V. Gouveia, Otoni Nóbrega Neto

Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência - DEESP/UFPE

rrba@ufpe.br, gltorres@ufpe.br, milde@ufpe.br, vicente.simoni@gmail.com, nisebez@yahoo.com.br, hugotvg@gmail.com,
otoninobrega@gmail.com

Solange Numeriano, Givanildo J. de Almeida

Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF

Av. Rua Delmiro Gouveia 333, Bongá, Cep: 50.761-901, Recife – PE, Brasil

solangen@chesf.gov.br, almeida@chesf.gov.br

Resumo - Este artigo descreve o desenvolvimento de um programa computacional para Despacho Hidrotérmico-Eólico (DHO), o qual é o produto final de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) desenvolvido pela equipe do Laboratório Digital de Sistemas de Potência (LDSP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O objetivo do programa de DHO é avaliar possíveis cenários energéticos do Brasil e das suas regiões, calculando valores ótimos mensais de despacho para as usinas e informando quando da ocorrência de déficit. Os problemas de DHO são formulados nesse trabalho como problemas de Programação Linear (PL) e resolvidos por Métodos de Pontos Interiores (PI). Os resultados indicam que o programa desenvolvido pode ser útil como ferramenta auxiliar no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro.

Palavras-chave: Despacho Hidrotérmico Ótimo, Métodos de Pontos Interiores, Programação Linear.

I. INTRODUÇÃO

A operação diária de um sistema elétrico de potência envolve o despacho de usinas hidroelétricas, térmicas e eólicas. Devido à grande dimensão dos sistemas elétricos, o despacho das usinas é uma tarefa extremamente complexa, podendo ser realizada de modo eficiente, buscando o menor custo e o maior nível de segurança, com um auxílio de um programa de Despacho Hidrotérmico-Eólico Ótimo (DHO). O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto dos sistemas de geração e de transmissão de energia elétrica. O sistema de geração tem a característica descentralizada devido à grande dimensionalidade do país. Desta forma, as fontes geradoras de grande porte são distribuídas ao longo de todo território nacional.

O planejamento da operação de um sistema elétrico tem como objetivo definir uma estratégia de geração para cada usina que minimiza o valor esperado dos custos operativos no período de planejamento [1]. Os custos operativos referem-se aos gastos com combustíveis nas usinas termoeletricas, custos de não atendimento à carga e eventuais compras de energia de sistemas vizinhos (intercâmbio). A interligação entre sistemas vizinhos permite uma redução dos custos de operação, por meio do

intercâmbio de energia e um aumento da confiabilidade de fornecimento, por meio da repartição de reservas [2]. Caso um sistema possua um custo de operação mais elevado que um vizinho, o mais econômico seria transferir a energia do sistema de custo de operação mais barato para o sistema de custo de operação mais elevado. Os intercâmbios de energia entre sistemas contendo usinas térmicas resultam na otimização global dos custos de operação do sistema interligado.

Um sistema hidrotérmico-eólico interligado de grande porte pode ser dividido em sistemas menores para facilitar sua operação. Os critérios dessa divisão estão associados à posição geográfica das principais linhas de transmissão e das bacias hidrográficas. No planejamento da operação, também é importante considerar a contínua expansão dos sistemas pela construção de novas usinas para atendimento da demanda crescente dos centros de consumo.

O despacho ótimo fornece uma política de operação das usinas hidroelétricas, eólicas, térmicas e intercâmbios para atendimento ao mercado de energia elétrica e eventualmente, informando se há déficit. Na formulação do problema para otimização do despacho hidrotérmico-eólico, pode-se usar o custo de operação do sistema, composto pelo custo do déficit e da geração térmica[3].

Este trabalho apresenta um programa computacional de DHO, desenvolvido a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Modelo de Otimização da Simulação Energética de Energia Eólica e Outras Fontes no NE” – ANEEL Nº 0048-022-2006, fruto da parceria entre CHESF e UFPE. Os problemas de DHO são formulados nesse trabalho como problemas de programação linear (PL). Devido ao histórico de êxito dos métodos de pontos interiores (PI) na solução de problemas de PL de grande porte [4,5], os problemas de DHO são resolvidos pelos algoritmos Primal-Dual Simplex e Primal-Dual Predictor Corretor de PI.

Esse artigo apresenta o desenvolvimento de um programa computacional de DHO e os resultados numéricos de simulações baseadas no Plano Decenal de Energia (PDE) 2010-2019. O presente trabalho contribui na formulação de problemas de DHO e na solução dos mesmos por meio dos algoritmos de PI.

O artigo está dividido da seguinte forma. A seção II apresenta o problema de DHO e a forma padrão do problema de PL. A seção III apresenta os algoritmos de PI utilizados na solução de problemas de DHO. A seção IV

Os autores agradecem ao apoio obtido pela CHESF, que é a empresa financiadora do projeto.

apresenta o programa computacional de DHO. A seção V apresenta as simulações e resultados numéricos obtidos. A seção VI apresenta as conclusões.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE DHO

O problema de DHO depende das características físicas do sistema e das suas restrições operacionais. O problema de DHO pode ser formulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } C(GT, DEF) \\ & \text{sujeito a:} \\ & V_{i,t-1} + A_{i,t} - (Q_{i,t} + S_{i,t}) - (I_{i,t} + T_{i,t} + E_{i,t}) \\ & + \sum_{j \in M} (Q_{j,t} + S_{j,t}) = V_{i,t} \\ & \sum_{i=1}^{NH_1} (H_{1,i,t}) + \sum_{j=1}^{NT_1} (GT_{1,j,t}) + \sum_{m=1}^{NE_1} (E_{1,m,t}) + \\ & + DEF_{1,t} - EXP_{12,t} + EXP_{21,t} = L_{1,t} \end{aligned}$$

em que:

$V_{i,t}$: volume do reservatório i , no período t ;
 $A_{i,t}$: volume da afluência natural do reservatório i , no período t ;
 $Q_{i,t}$: volume turbinado do reservatório i , no período t ;
 $S_{i,t}$: volume vertido do reservatório i , no período t ;
 $I_{i,t}$: volume retirado para irrigação do reservatório i , no período t ;
 $T_{i,t}$: volume retirado para transposição do reservatório i , no período t ;
 $E_{i,t}$: volume evaporado do reservatório i , no período t ;
 M_i : conjunto de usinas hidroelétricas a montante da usina i .
 $GT_{ki,t}$: produção da i -ésima usina hidroelétrica do sistema k no período t ;
 $GT_{kj,t}$: produção da j -ésima usina hidroelétrica do sistema k no período t ;
 $GE_{km,t}$: produção da m -ésima usina hidroelétrica do sistema k no período t ;
 $EXP_{12,t}$: fluxo de energia do sistema 1 para o 2 durante o período t ;
 $EXP_{21,t}$: fluxo de energia do sistema 2 para o 1 durante o período t ;
 $DEF_{k,t}$: déficit de energia do sistema k durante o período t ;
 $L_{k,t}$: carga do sistema k durante o período t ;
 NH_k : número de usinas hidroelétricas do sistema k ;
 NT_k : número de usinas térmicas do sistema k ;
 NE_k : número de usinas eólicas do sistema k .

A equação de balanço hídrico (1) é a parte principal do subproblema hidráulico, pois ela determina como as usinas hidroelétricas devem ser operadas. Cada bacia hidrográfica participa com sua equação de balanço hídrico na equação total do balanço de geração hídrica.

A equação de balanço de energia (2) estabelece como a carga está sendo atendida. Caso a carga não seja totalmente

suprida, resultará em um déficit no sistema. Essa equação é composta peça geração hidráulica, geração térmica, geração eólica, energia importada e exportada de outro sistema.

III. MÉTODOS DE PONTOS INTERIORES

Nesse artigo o problema de DHO é formulado como um problema de Programação Linear (PL) na seguinte forma padrão:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } c^T x \\ & \text{sujeito a: } Ax = b \\ & \quad l \leq x \leq u \end{aligned} \quad (3)$$

em que $x \in R^n$ é um vetor de variáveis de decisão, incluindo as variáveis de controle e estado; $A \in R^{m \times n}$, $b \in R^m$ e $c \in R^n$ são constantes; e l e u são limites mínimos e máximos sobre as variáveis x , correspondentes a limites físicos e operacionais do sistema. Por conveniência, o problema anterior pode ser reformulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } c^T x \\ & \text{sujeito a: } Ax = b \\ & \quad 0 \leq x \leq u \end{aligned} \quad (4)$$

em que $x = x' - l$, $u = u' - l$, $b = b' - Al$. Por questão de eficiência computacional, a forma padrão (4) será utilizada para o desenvolvimento dos algoritmos de solução, pois a mesma resulta em um problema de otimização de menor dimensão.

Nas seções seguintes são apresentados os dois algoritmos de PI utilizados na solução dos problemas de DHO: Primal-Dual Simplex e Primal-Dual Predictor Corretor.

A. Método Primal-Dual

O método Primal-Dual de PI [5,6], para resolver (4) opera sobre o seguinte problema modificado:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } c^T x - \mu_k \sum_{i=1}^n (x_i + \ln s_i) \\ & \text{sujeito a: } Ax = b \\ & \quad x - u + s = 0 \\ & \quad x > 0, s > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

em que s é um n -dimensional de variáveis de folga que transforma as restrições de limites simples em restrições de igualdade, e $\mu_k > 0$ é uma parâmetro de barreira que é monotonicamente reduzido a medida que as iterações progredem. As condições de estrita positividade sobre as variáveis de decisão $x > 0$ e sobre as variáveis de folga $s > 0$, são tratadas implicitamente por meio do controle de passo na atualização das variáveis.

Dado que a qualificação das restrições é observada, se x_* é um mínimo local de (5) então existem vetores de multiplicadores de Lagrange $y_* \in R^m$, $z_* \in R_+^n$ e $w_* \in R_+^n$, que satisfazem as condições de otimalidade de primeira-ordem de Karush-Kuhn-Tucker(KKT) [7]:

$$\nabla L(y, z, s, w, \mu_k) = \begin{bmatrix} A^T y + z - c \\ Ax - b \\ x - u + s \\ Xz - \mu_k e \\ Sw - \mu_k e \end{bmatrix} \quad (6)$$

em que X e S são matrizes diagonais com $X_{ii} = x_i$ e $S_{ii} = s_i$ e e é um vetor n -dimensional, de 1's.

A tarefa de maior custo computacional no algoritmo de PI é a montagem e solução do sistema linear (7) pelo método de Newton:

$$\begin{bmatrix} 0 & A^T & I & 0 & -I \\ A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla x \\ \nabla y \\ \nabla z \\ \nabla s \\ \nabla w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T y + z - c \\ Ax - b \\ x - u + s \\ Xz - \mu_k e \\ Sw - \mu_k e \end{bmatrix} \quad (7)$$

em que Z e W são matrizes diagonais com $Z_{ii} = z_i$ e $W_{ii} = w_i$. Os principais passos do algoritmo primal-dual de PI são descritos no Alg. 1.

1. Faça $k = 0$, escolha $\mu_0 > 0$ e um ponto inicial $v_0 = (x_0, y_0, z_0, s_0, w_0)$ tal que $(x_0, z_0, s_0, w_0) > 0$.
2. Obtenha o sistema de Newton (7) para (6) no ponto v_k , e resolva

$$\nabla_y^2 L(y, z, s, w, \mu_k) \Delta v = -\nabla_y L(y, z, s, w, \mu_k)$$
 para a direção de busca Δv .
3. Calcule a nova estimativa da solução

$$v_{k+1} = v_k + \alpha_k \Delta v$$
 em que $\alpha_k = \min\{a_k^p, a_k^D\}$, definidos por

$$\alpha_k^p = \min \left\{ \gamma \min_{\Delta_i < 0} \left\{ \frac{-x_i^k}{\Delta x_i}, \frac{-s_i^k}{\Delta s_i} \right\}, 1 \right\} \quad (a)$$

$$\alpha_k^D = \min \left\{ \gamma \min_{\Delta_i < 0} \left\{ \frac{-z_i^k}{\Delta z_i}, \frac{-w_i^k}{\Delta w_i} \right\}, 1 \right\} \quad (b)$$
4. Se yv_{k+1} satisfaz o teste de convergência

$$\|\nabla_y L(y_{k+1}, \mu_k)\| \leq \varepsilon$$
 então FIM. Senão, calcule $\mu_{k+1} < \mu_k$, faça $k \leftarrow k + 1$, e retorne para o Passo 2.

Alg. 1: Algoritmo de PI para resolver (5).

A solução direta do sistema (7) requer a fatorização da matriz dos coeficientes, cuja ordem é $(4n+m)$. Por isso, algoritmos práticos para solução de problemas de grande porte, como é o caso de problemas de DHO, realizam algumas modificações quanto à forma de resolver o sistema linear (7). De acordo com [8], um procedimento prático é fracionar a solução do sistema linear (7), obtendo o vetor de correções Δv a partir do Alg. 2.

1. Defini-se a matriz diagonal:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & & & & \\ & Z & & & \\ & & S^{-1} & & \\ & & & W & \\ & & & & -1 \end{bmatrix} \quad (1a)$$
2. Definem-se os vetores auxiliares:

$$r_c = A^T y + z - w - c \quad (2a)$$

$$r_b = Ax - b \quad (2b)$$

$$r_u = x - u + s \quad (2c)$$

$$r_{xz} = Xz - \mu_k e \quad (2d)$$

$$r_{sw} = Sw - \mu_k e \quad (2e)$$
3. Redefini-se o vetor r_c por:

$$r_c = r_c - \begin{bmatrix} -1 & & & & \\ & Z^{-1} & & & \\ & & S^{-1} & & \\ & & & W & \\ & & & & -1 \end{bmatrix} r_{xz} + S^{-1} (r_{sw} - W r_u) \quad (3a)$$
4. Obtêm-se os vetores de correções por:

$$DA^T \Delta y = - \begin{bmatrix} -1 & & & & \\ & Z & & & \\ & & S^{-1} & & \\ & & & W & \\ & & & & -1 \end{bmatrix} r_c \quad (4a)$$

$$\Delta x = D(A^T \Delta y + r_c) \quad (4b)$$

$$\Delta z = -X^{-1} (\Delta x + r_{xz}) \quad (4c)$$

$$\Delta s = - (r_u + r_{sw}) \quad (4d)$$

Alg. 2: Solução do sistema linear (7) pelo algoritmo Primal-Dual, forma reduzida.

A operação de maior custo computacional no Alg. 2 é a obtenção do vetor de correções Δv em (12a), pois envolve a fatorização da matriz ADA^T de ordem m . Embora a matriz ADA^T não seja esparsa, devido a redução da dimensão dos problemas resolvidos esta forma alternativa de cálculo é consideravelmente mais rápida que a solução direta do sistema linear (7), sendo, portanto, adotada neste trabalho.

B. Método Primal-Dual Preditor Corretor

A fatorização sistema linear (7) é a tarefa mais onerosa em um algoritmo de PI e, portanto, a decomposição da matriz dos coeficientes deve ser utilizada o máximo possível antes de se obter uma nova estimativa na iteração seguinte. O método Primal-Dual Preditor Corretor de PI [9] utiliza a mesma fatorização para calcular duas direções, uma preditora e outra corretora, e calcula a direção resultante pela sua soma. O objetivo é melhorar a centralidade dos pontos calculados, resultando em maiores comprimentos de

passo e, assim, reduzindo o número de iterações necessário à convergência. O Alg.3 destaca os principais passos de um algoritmo prático para o método Primal-Dual Predictor Corretor de PI [8].

1. Defini-se a matriz diagonal:

$$D = \begin{bmatrix} \bar{1} & & & \\ & -1 & & \\ & & S^{-1} & \\ & & & W \end{bmatrix} \bar{1} \quad (3)$$

2. No passo predictor, definem-se os vetores auxiliares:

$$r_c = A^T y + z - w - c \quad (4a)$$

$$r_b = Ax - b \quad (4b)$$

$$r_u = x - u + s \quad (4c)$$

$$r_{xz} = Xz \quad (4d)$$

$$r_{sw} = Sw \quad (4e)$$

3. Redefine-se r_c , fatora-se a matriz ADA^T e obtêm-se as correções Δv de acordo com o Alg.2.

4. No passo corretor, definem-se os vetores auxiliares:

$$r_c = 0 \quad (5a)$$

$$r_b = 0 \quad (5b)$$

$$r_u = 0 \quad (5c)$$

$$r_{xz} = -\mu_{af}^k e + \Delta X \Delta z \quad (5d)$$

$$r_{sw} = -\mu_{af}^k e + \Delta S \Delta w \quad (5e)$$

5. Redefine-se r_c e obtêm-se as correções de Δv de acordo com o Alg.2 usando a fatorização da matriz ADA^T obtida no passo 3.

Alg. 3: Solução do sistema linear (7) pelo algoritmo Primal-Dual, forma reduzida.

IV. DHOVISUAL

Com o objetivo de testar as metodologias propostas para solucionar problemas de DHO foi desenvolvido um programa computacional, denominado dhoVisual (Despacho Hidrotérmico-Eólico Ótimo Visual). O dhoVisual foi criado utilizando a linguagem de programação MATLAB, utilizando os recursos gráficos do GUIDE (*Graphics User Interface Design Environment*), e contém as rotinas de pontos interiores descritas no artigo.

Dentre os ambientes do dhoVisual destacam-se os seguintes:

- Menu Principal: compreende os botões “Cenário”, “Método de Solução”, “Pesquisa”, “Eólicas” e “Relatórios”;
- Barra de Ferramentas: compreende os botões “Executar”, “Visualizar”, “Salvar” e “Ajuda”;

- Barra de Status: destaca informações úteis sobre o processo de otimização, diretório corrente e data de simulação.

O usuário poderá navegar pelas diferentes funcionalidades do sistema, decidindo por simular um dos cenários disponíveis, alterar o método de solução, realizar pesquisas detalhadas sobre as usinas hidroelétricas, térmicas e eólicas, adicionar usinas eólicas e gerenciar relatórios de otimização e planejamento.

A. Cenário

Na Figura 1 pode-se visualizar o ambiente Cenário do dhoVisual, no qual o usuário pode escolher um cenário de simulação. Além disso, os principais arquivos usados na otimização são listados na tela.



Figura 1: Ambiente Cenário.

Os cenários são arquivos previamente formatados pelo usuário de acordo com o caso de simulação desejado. O usuário poderá salvar múltiplos cenários na pasta do programa e selecionar o cenário de interesse para ser simulado. Nesse arquivo, deve ser previamente especificados dados como, por exemplo, o ano da hidrologia, sistemas e usinas que irão compor a simulação.

Na Figura 2 pode ser visualizado um exemplo de um arquivo de cenário.

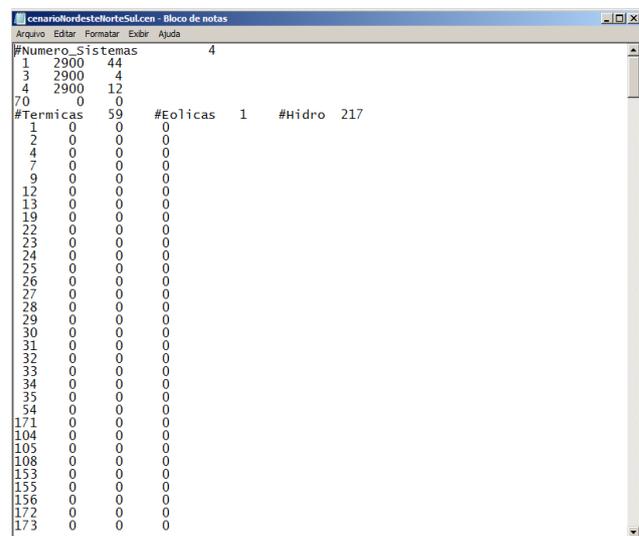


Figura 2: Arquivo Cenário.

B. Métodos de Solução

Na Figura 3 pode-se visualizar o ambiente Método de Solução, no qual o usuário define o método de solução de PI que será utilizado na otimização. Dois algoritmos estão disponíveis: Primal-Dual Simplex e Primal-Dual Predictor Corretor. Além disso, o usuário poderá escolher entre usar métodos de PI com passos iguais ou distintos e ainda alterar os parâmetros do algoritmo escolhido.

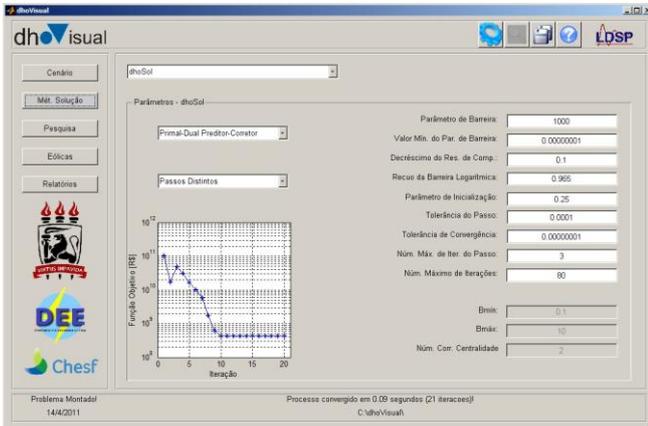


Figura 3: Ambiente Método de Solução.

Caso nenhum método de simulação seja escolhido imediatamente após o carregamento do cenário, o algoritmo padrão do dhovisual é o Primal-Dual Predictor Corretor de Pontos Interiores, com comprimentos de passo distintos e valores dos parâmetros iguais aos definidos na interface gráfica, os quais são recomendados para uso, em situações gerais, em qualquer um dos dois algoritmos.

C. Pesquisa

Na

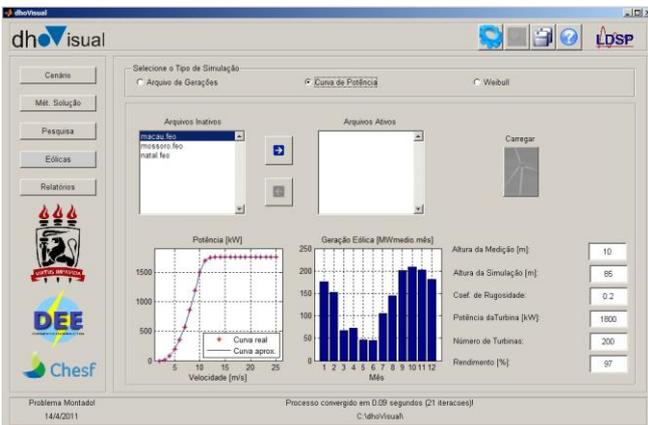


Figura 5 pode ser visualizado o ambiente Pesquisa, no qual o usuário pode fazer buscas detalhadas sobre dados técnicos das usinas hidroelétricas, térmicas e eólicas.

Na opção hidroelétrica, podem ser visualizados dados como código da usina, usina jusante, tipo, nome do sistema a que a usina pertence, volume mínimo e máximo, produtividade e vazão turbinada mínima e máxima. Além disso, são detalhados o volume armazenado (para usinas tipo reservatório), a vazão turbinada e o vertimento mensal.

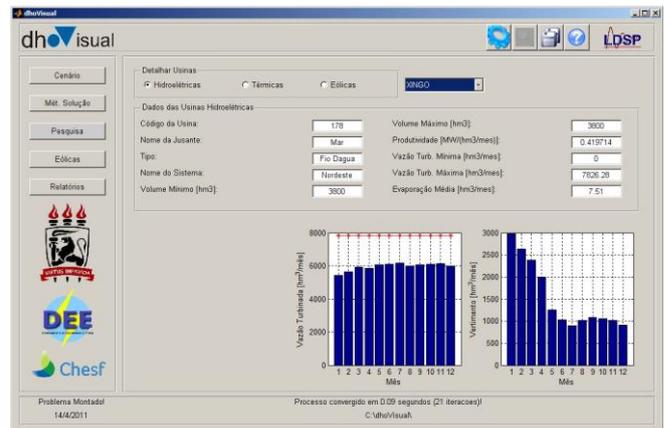


Figura 4: Ambiente Pesquisa.

D. Eólicas

Na Figura 5 pode ser visualizado o ambiente Eólicas, em que o usuário pode definir quais dos parques eólicos disponíveis serão de fato considerados na simulação.

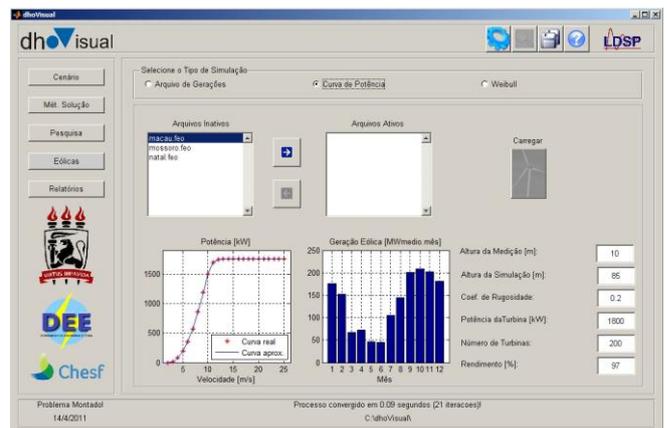


Figura 5: Ambiente Eólicas.

O usuário pode prover os dados eólicos de duas formas distintas: por meio das gerações médias mensais ou das velocidades médias horárias, ambas durante o período de um ano. No caso das velocidades médias mensais serem fornecidas, existem ainda duas opções para a transformação dos dados de ventos horários em gerações médias mensais: usar diretamente a curva de potência das turbinas do parque (fornecida pelo usuário) ou usar a função de densidade de probabilidade de Weibull [10,11], calculando o valor médio mensal da velocidade do vento no parque.

E. Relatórios

Na pode ser visualizado o ambiente Relatórios, no qual são fornecidos gráficos com os resultados do processo de otimização.

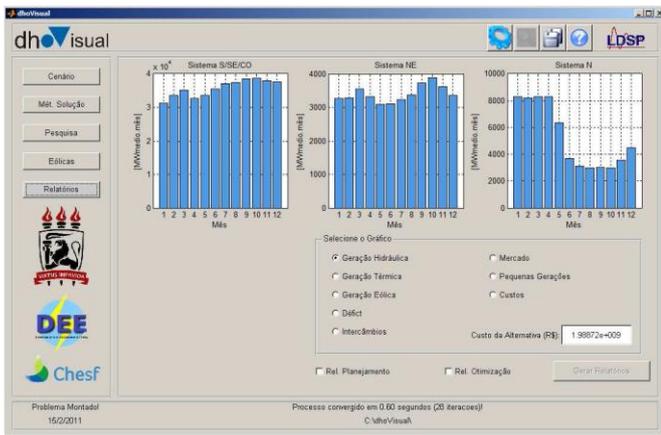


Figura 6: Ambiente Relatórios.

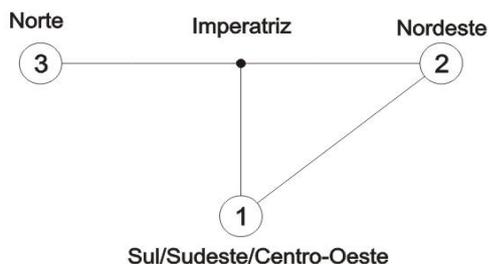
No Figura 6 ambiente Relatórios, é possível gerar relatórios do processo de otimização, contendo dados como a dimensão do problema, e do planejamento hidrotérmico-eólico ótimo, contendo os valores ótimos para as variáveis como a geração eólica média mensal em um determinado sistema.

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados das simulações realizadas, para análise do desempenho do dhovisual. Em todas as simulações, foram utilizados os arquivos de estudos de geração do PDE 2010-2019, disponibilizados para consulta pública pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [12].

Foi escolhido como representativo o período hidrológico 1950 a 1959, pois o mesmo abrange o período crítico, entre os anos de 1952 e 1957. O estudo do período crítico torna possível analisar a solução ótima encontrada com relação à redução da geração térmica em virtude da adição de usinas eólicas.

Para verificar o impacto das usinas eólicas sobre a geração térmica foram realizadas duas simulações. A primeira simulação considera o SIN com configuração de usinas de acordo com o PDE 2010-2019. Na segunda, são adicionados três parques eólicos ao sistema Nordeste (NE) utilizando a opção “Curva de Potência”, no ambiente Eólicas. Em todas as simulações foram considerados limites de intercâmbios apenas entre os sistemas Norte (N), NE e Sul/Sudeste/Centro-Oeste (S/SE/CO), de acordo com a figura X



SIN - Sistema Interligado Nacional

Figura 7: Representação de intercâmbios no SIN.

Na Figura 8 e Figura 9 pode ser visualizada a forma de exibição dos gráficos da geração térmica para os sistemas Norte N, NE e S/SE/CO para a primeira simulação e segunda simulação respectivamente.

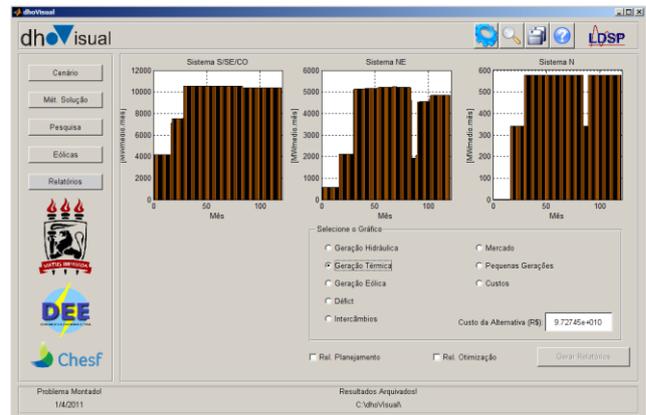


Figura 8: Exibição dos gráficos de geração térmica, sem adição de eólica no ambiente Relatórios.

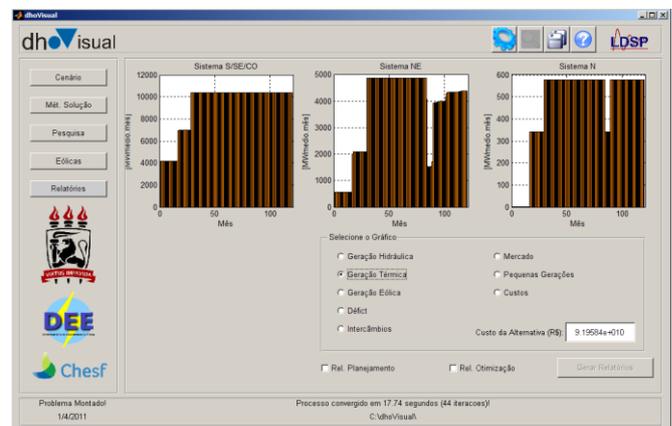


Figura 9: Exibição dos gráficos de geração térmica, com adição de eólica no ambiente Relatórios.

O ambiente Relatórios apresenta ainda uma estimativa para o valor em reais do Custo da Alternativa, ou seja, o custo total do problema de DHO com o cenário energético escolhido. Considerando as duas simulações descritas acima, o custo da alternativa da primeira simulação, a qual considera o SIN em sua configuração padrão, é de R\$ $9,72745 \times 10^{10}$. O custo ótimo obtido da segunda simulação, a qual considera a adição das usinas eólicas ao sistema NE, é de R\$ $9,19584 \times 10^{10}$. Assim, a adição dos três parques eólicos ao sistema NE representou uma redução de cerca de R\$ $5,3161 \times 10^9$. Análises semelhantes podem ser realizadas como o objetivo de balizar investimentos em novos parques eólicos. Por exemplo, a potência instalada e a localização de novas usinas eólicas podem ser avaliadas em relação à capacidade de escoamento da energia gerada para sistemas vizinhos, visando à redução do custo total de operação do sistema interligado.

Nas Figura 10 e Figura 11 pode ser visualizado o montante de geração térmica economizado quando se faz uso dos parques eólicos no sistema NE. Nota-se que devido à interligação dos sistemas, apesar das eólicas estarem presentes apenas no NE, há redução considerável de geração térmica em determinados meses no sistema S/SE/CO. No

sistema N não há alterações significativas nos valores de geração térmica.

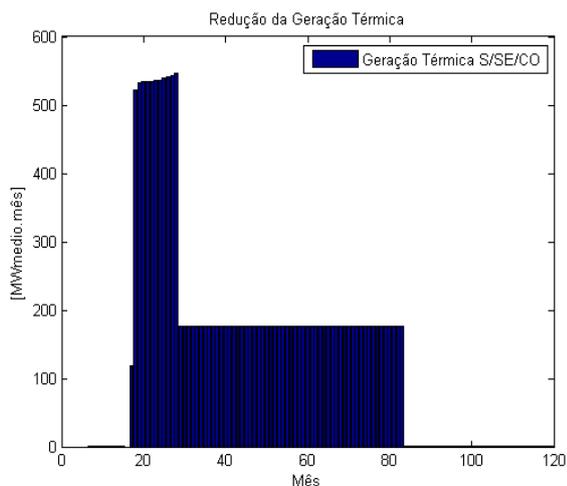


Figura 10: Redução da Geração Térmica do sistema S/SE/CO

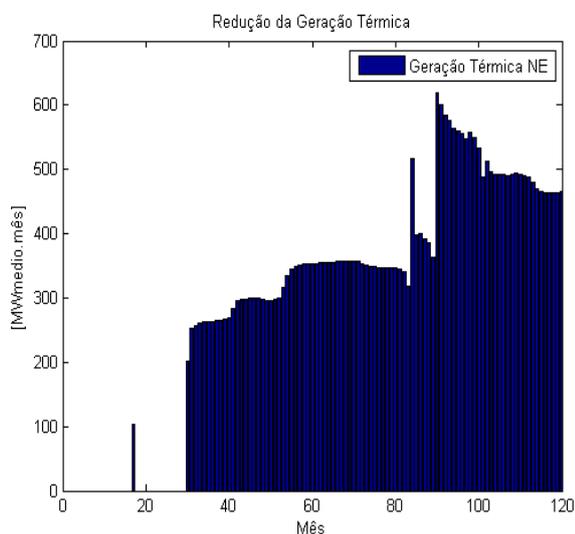


Figura 11: Redução da Geração Térmica do sistema NE

Analisando o PDE 2010-2019 verificam-se duas usinas consideradas fundamentais para o suprimento de energia elétrica no país a partir de 2013. São as usinas hidrelétricas Santo Antônio e Jirau, as duas construídas no mesmo rio, rio Madeira. A usina de Jirau está prevista para ser concluída em 2016, ano em que terá capacidade instalada de 3300MW, porém com algumas máquinas operando já a partir de 2013. A conclusão da usina Santo Antônio está prevista para 2015, ano em que terá capacidade instalada de 3150MW, porém apresentará máquinas operando já a partir de 2012.

Com o intuito de verificar nos resultados o impacto causado pelas usinas hidroelétricas Santo Antônio e Jirau, foram realizadas as mesmas simulações anteriores, porém considerando que as usinas Santo Antônio e Jirau sofreriam um atraso de dois anos em seus respectivos cronogramas de obras.

Na Figura 12 podem ser visualizados os gráficos da geração térmica por sistema, no ambiente Relatórios do dhovisual, sem considerar os parques eólicos no sistema NE.

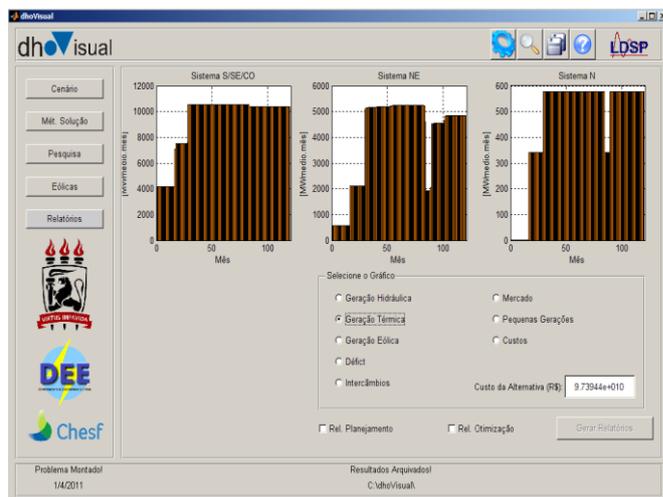


Figura 12: Exibição dos gráficos de geração térmica, sem adição de eólica no ambiente Relatórios.

A Figura 13 mostra os mesmos gráficos de geração térmica só que considerando os três parques eólicos do sistema NE.

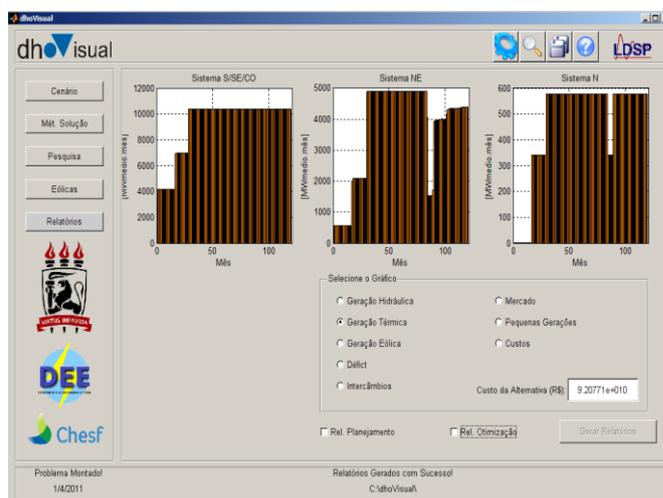


Figura 13: Exibição dos gráficos de geração térmica, com adição de eólica no ambiente Relatórios.

Verifica-se que o custo das alternativas diferem dos custos das primeiras simulações. Caso as obras das usinas de Jirau e Santo Antônio sofram um atraso de dois anos, os custos das alternativas sofrerão um aumento de cerca de R\$1.200.000,00.

VI. CONCLUSÕES

Esse artigo apresentou o desenvolvimento de um programa de DHO e os resultados de simulações para o SIN de acordo com as premissas estabelecidas no PDE 2012-2019. O dhovisual é um programa computacional amigável e possui interface gráfica, facilitando a interação com o usuário ao prover gráficos e relatórios das simulações, e implementa sofisticados algoritmos de PI para a solução dos problemas de DHO.

As simulações destacaram-se a redução do custo de operação do SIN devido à adição de usinas eólicas no sistema NE e o aumento desse custo para a hipótese de atraso no cronograma de obras das usinas Santo Antônio e Jirau. Os resultados obtidos são preliminares e indicam que

o dhoVisual pode ser útil como ferramenta auxiliar no planejamento da operação do sistema elétrico brasileiro.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. A. M. Fortunato, T. A. A. Neto, J. C. R. Albuquerque, e M. V. F. Pereira, “Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica”, Universidade Federal Fluminense, Brasil, 1990
- [2] CEPEL, “Modelo Decomp Manual de Referência”, Versão 11.0, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [3] R.R. B. Aquino, “Redes Neurais Artificiais Recorrentes: Uma Aplicação à Otimização da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Geração”. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Brasil, 2001
- [4] N. A. Karmarkar, “A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming”, *Combinatorica* (4): 373–395, 1984
- [5] M. H Wright, “The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences”, *Bulletin of The American Mathematical Society* 42(1): 39–56, 2004
- [6] S. J Wright, *Primal-Dual Interior-Point Methods*, SIAM, 1997
- [7] J. Nocedal, and S. J Wright, *Numerical Optimization*, Springer, 2006
- [8] Y. Zhang, “Solving large-scale linear programs by interior-point methods under the matlab environment”, *Technical report*, Optimization Methods and Software, 1996
- [9] S. Mehrotra, “On the implementation of a primaldual interior point method”, *SIAM J. on Optimization* (2): 575–601, 1992.
- [10] G. Rodrigues, “Características de vento da região nordeste - análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2003.
- [11] J. S. Rohatgi, V. and Nelson. “*Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power*”, Alternative Energy Institute, West Texas ANM University, 1994
- [12] Empresa de Pesquisa Energética [Online]. Disponível: <http://www.epe.gov.br>