

Despacho Conjunto de Máquinas com Previsão de Vazão

D.M. Falcão C.L.T. Borges L.F. Rocha R.H.S. Machado J.A.S. Dias D.S. Moitas

Resumo- Este trabalho apresenta o modelo computacional desenvolvido para otimização do despacho das máquinas e da geração da Usina Hidrelétrica Endesa Cachoeira Dourada (UHE-EC). Neste trabalho, o Despacho de Máquinas pode ser resolvido por duas abordagens alternativas: a) **Abordagem Heurística:** através da experiência acumulada de operadores, estes determinam quais as configurações de máquinas adequadas para cada intervalo; b) **Abordagem Meta-Heurística:** a escolha das possíveis configurações de máquinas é realizada automaticamente por um processo meta-heurístico (Algoritmos Genéticos). O artigo apresenta, também, informações sobre o software desenvolvido.

Palavras-chave— Despacho de geração, unit commitment, eficiência hidrelétrica.

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o modelo computacional desenvolvido para otimização do despacho das máquinas e da geração da Usina Hidrelétrica Endesa Cachoeira Dourada (UHE-EC). O despacho de uma usina hidrelétrica consiste em duas etapas, executadas para um horizonte de operação escolhido (neste trabalho, um dia) [1]. Essas etapas são:

- *Despacho de Máquinas:* determina, em intervalos de tempo ($\frac{1}{2}$ hora, neste trabalho), quais as máquinas que serão colocadas em operação para atender à programação de geração da usina;
- *Despacho de Geração:* para as máquinas em operação, determina qual a geração média no intervalo.

Os dois problemas acima são resolvidos de forma integrada, tendo como objetivo a maximização da energia gerada com a água disponível para a usina e sujeitos a restrições operacionais tais como faixa de operação das turbinas, restrições elétricas da transmissão, número de partidas e paradas, etc. A maximização da energia gerada é baseada na minimização da função de perdas das unidades, as quais são constituídas por perdas causadas por atrito nos condutos forçados e perdas por variação no rendimento das turbinas (curva colina) [2].

O problema completo integrado é um problema de programação inteira mista não-linear, que é uma classe de problemas de difícil solução. O problema se torna mais ameno quando se consegue decompor as duas partes, separando-se o problema com variáveis inteiras (Despacho de Máquinas)

do problema com variáveis contínuas (Despacho de Geração).

Neste trabalho, o Despacho de Máquinas pode ser resolvido por duas abordagens alternativas:

- *Abordagem Heurística:* através da experiência acumulada de operadores, estes determinam quais as configurações de máquinas adequadas para cada intervalo.
- *Abordagem Meta-Heurística:* a escolha das possíveis configurações de máquinas é realizada automaticamente por um processo meta-heurístico (Algoritmos Genéticos) [3,4,5].

Os problemas de Despacho de Geração resultantes, em ambas as abordagens, são resolvidos por técnicas convencionais de programação não-linear.

Especificamente, os seguintes objetivos foram atendidos no software desenvolvido:

- Identificar as características da operação UHE-EC visando estabelecer um modelo matemático da mesma na forma de um problema de otimização;
- Disponibilizar um software específico para o despacho das máquinas da UHE-EC, com interface amigável e de fácil utilização pelos operadores.

O projeto Despacho Conjunto de Máquinas com Previsão de Vazão, código 2934001/2007, está concluído. A entidade executora foi a Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisa e Estudos Tecnológicos e como entidades de suporte financeiro temos a Central Geradora Termelétrica Fortaleza S/A e Centrais Elétricas Cachoeira Dourada.

II. ESPECIFICAÇÃO FUNCIONAL DO SOFTWARE

O software desenvolvido, de acordo com os objetivos do projeto, possui quatro grandes funcionalidades fundamentais [6,7,8]:

- Determinação da programação da usina;
- Definição das gerações por barramento;
- Despacho das máquinas;
- Despacho das gerações.

Para contemplar estas funcionalidades e possibilitar a interação do usuário com o software, este foi desenvolvido de forma modular, segundo a visão geral apresentada na Figura 1. Dessa forma, os módulos principais do software são:

D.M. Falcão (falcao@nacad.ufrj.br) e C.L.T. Borges (carmen@nacad.ufrj.br) são docentes da COPPE/UFRJ.

L.F. Rocha, R.H.S. Machado e J.A.S. Dias são alunos da COPPE/UFRJ. D.S. Moitas (dmoitas@endesabr.com.br) trabalha na Endesa Geração Brasil.

- Módulo para Programação da Usina;
- Módulo para Definição de Geração por Barramento;
- Módulo para Configuração de Máquinas;
- Módulo para Despacho de Máquinas e de Geração.

Apesar de possuírem programação independente, a utilização destes módulos pode ser feita de forma acoplada, ou seja, a saída de um pode ser a entrada do outro, ou desacoplado, onde os dados de entrada são informados pelo operador independentemente da utilização de outro módulo. Estes módulos serão melhor detalhados nas próximas seções.

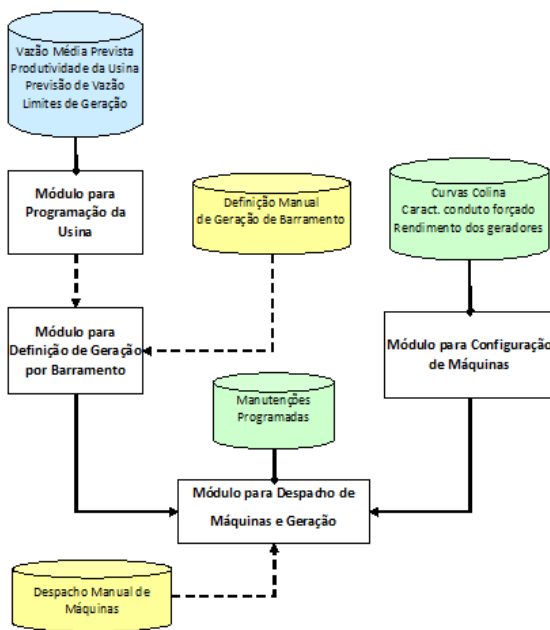


Figura 1. Visão geral do software

III. MÓDULO PARA PROGRAMAÇÃO DA USINA

O Módulo para Programação da Usina foi desenvolvido com base em três modelos independentes, denominados “Programa da Geração da Usina”, “Programa da Geração por Barramento” e “Cálculo das Grandezas do Reservatório”.

O “Programa da Geração da Usina” possibilita ao usuário obter a Programação Diária da Operação (PDO) de modo otimizado, minimizando a diferença entre a geração prevista e a geração programada total.

A geração prevista é obtida a partir da vazão média prevista (fornecida pelo ONS) e a produtividade média da usina. Por outro lado, a geração programada total é a soma da geração em cada intervalo considerado. Vale destacar que, nessa etapa, além dos níveis de geração, são apresentados, também, os resultados do vertimento e da variação de volume em intervalos de 30 minutos, com relação ao volume inicial. Isso é feito com base na previsão de vazão fornecida

pela UHE Itumbiara.

O “Programa da Geração por Barramento”, por sua vez, visa determinar, de forma automática, a potência injetada em cada barramento (de 138 e 230 kV) segundo critérios estipulados. Esses valores são usados como entrada para o Módulo para Definição de Geração por Barramento, que será descrito na seção seguinte. Assim, o modelo em questão recebe como dados de entrada a geração em intervalos de 30 min, que pode ser obtida através do “Programa da Geração da Usina” ou determinada pelo operador, e os limites para a divisão (informação opcional). Caso não sejam fornecidos os limites, é utilizada uma divisão padrão, que será apresentada mais a frente.

Adicionalmente, o “Cálculo das Grandezas do Reservatório” fornece os resultados das alterações do reservatório ao final do dia, tais como a variação da cota, a variação do volume e a vazão turbinada média, além da geração total prevista e programada.

A Figura 2 apresenta, em diagrama de blocos, os esquemas de entrada e saída dos três modelos desenvolvidos.

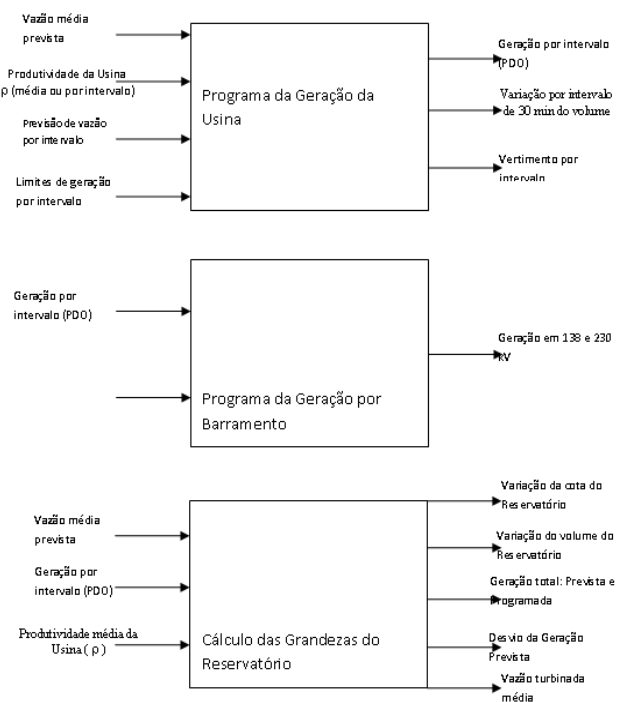


Figura 2. Esquema de entrada e saída dos modelos desenvolvidos.

A. O Programa da Geração da Usina

Conforme mencionado anteriormente, o problema de otimização a ser solucionado pelo Programa da Geração da Usina tem como função objetivo a minimização da diferença entre a Geração Total Prevista e a Geração Total Programada. A Geração Total Prevista é obtida através do produto entre a vazão prevista (48 intervalos de 30 minutos vezes a vazão média prevista, fornecida pelo ONS) e a produtividade média da usina. A Geração Programada é o principal dado de saída do programa. Este problema, de função objetivo e restrições lineares (Programação Linear), foi formulado como segue.

$$\text{Min } Ger_{d_{prev}} = \sum_{i=1}^T P_i \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\text{Restrição de igualdade: } a_i = \Delta V_i - \Delta V_{i-1} + \frac{1}{\rho_i} P_i + S_i \quad (2)$$

$$\text{Limitada por: } \Delta V_{imin} \leq \Delta V_i \leq \Delta V_{imax} \quad (3)$$

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (4)$$

$$S_{imin} \leq S_i \leq S_{imax} \quad (5)$$

$$\text{Restrição de desigualdade: } \sum P_i \geq Ger_{prev} \quad (6)$$

onde:

- Ger_{prev} é a Geração total prevista;
- P_i é a potência gerada no intervalo i ;
- a_i é a afluência no intervalo i ;
- ΔV_i é a variação do volume do reservatório no intervalo i , com relação ao volume do início do dia;
- ρ_i é a produtividade da usina no intervalo i ;
- S_i é o vertimento no intervalo i .
- T é o número de intervalos considerados (para variações de 30 minutos, temos 48 intervalos)

B. Alocação de Geração por Barramento

O objetivo do modelo do “Programa da Geração por Barramento” é a separação, de forma automática, da potência total gerada pela usina nos níveis de 138 e 230 kV. Em outras palavras, esta separação pode ser feita a partir do resultado obtido pelo “Programa da Geração da Usina” ou a partir da programação feita pelo operador manualmente, no Módulo para Definição de Geração por Barramento, a ser descrito na próxima seção. Adicionalmente, o usuário pode definir os limites desejados, mantendo a filosofia adotada, ou utilizar valores padrões, implementados no programa.

A filosofia utilizada se baseia em dois valores principais: a maior potência para a qual toda a geração será realizada pelas máquinas conectadas ao barramento de 138 kV; e a menor potência a ser gerada no lado de 230 kV. Deste modo, a divisão segue a Tabela I.

Tabela I. Limites para a separação da geração

	138 kV	230 kV
Até \max_{138} MW	P_t	0
$\max_{138} < P_t \leq (\max_{138} + \min_{230})$	$P_t - \min_{230}$	70
$(\max_{138} + \min_{230}) \leq P_t$	\max_{138}	$P_t - (\max_{138} + \min_{230})$

onde:

- P_t – Potência total gerada pela usina;
- \max_{138} – Máxima potência a ser gerada pelo lado de 138 kV;
- \min_{230} – Mínima potência a ser gerada pelo lado de 230 kV.

Os valores padrão utilizados na implementação foram $\max_{138} = 140$ MW e $\min_{230} = 70$ MW.

C. Cálculo das Grandezas do Reservatório

O cálculo das grandezas do reservatório foi feito baseado em valores típicos, obtidos a partir de tabelas utilizadas pela Endesa. A modelagem utilizada segue as seguintes equações:

$$Ger_{prev} = 48 * \rho * vaz_{med} \quad (7)$$

$$\Delta Ger = Ger_{prev} - Ger_{tot} \quad (8)$$

$$\Delta V_{az} = \frac{\Delta Ger}{0,271} \quad (9)$$

$$Vaz_{turb} = \frac{Ger_{tot}}{0,271 * 48} \quad (10)$$

$$\Delta Vol = 3600 * \Delta V_{az} \quad (11)$$

$$\Delta Cota = \Delta Vol / 666667 \quad (12)$$

onde:

- Ger_{prev} é a geração total prevista;
- vaz_{med} é a vazão média prevista, fornecida pelo ONS;
- ΔGer é a diferença entre a geração total prevista e programada;
- Ger_{tot} é o somatório da geração horária programada;
- ΔV_{az} é a vazão acumulada ou deplecionada;
- Vaz_{turb} é a vazão turbinada média prevista;
- ΔVol é a variação do volume do reservatório;
- $\Delta Cota$ é a variação na cota do reservatório.

IV. DESPACHO DE MÁQUINAS

O despacho de máquinas, no algoritmo desenvolvido com base na abordagem Meta-Heurística, foi tratado através de Algoritmos Genéticos – AG. O AG implementado possui algumas particularidades, que foram consideradas para que o mesmo pudesse ser ajustado, da melhor maneira possível, ao problema da UHE-EC. O ajuste em questão está associado com a codificação das variáveis, que é feita, geralmente, de duas formas, nesse tipo de problema. A primeira diz respeito à codificação binária (ou booleana), onde o cromossomo é composto por genes que indicam o estado de cada máquina em uma usina (Ligada = 1 e Desligada = 0). Nessa codificação, o tamanho do cromossomo é dado pelo produto do número de máquinas da usina pela quantidade de intervalos de tempo. Para o caso da UHE-EC, com 10 máquinas, a utilização dessa codificação acarretaria um cromossomo de 480 genes (10 máquinas x 48 intervalos de tempo). Porém, isso

gera um imenso espaço de busca, que inclui um número considerável de soluções inválidas, para o despacho típico da UHE-EC, como por exemplo, combinações com 8, 9 ou mesmo as 10 máquinas desligadas. Além disso, o espaço de busca contaria, também, com soluções viáveis relacionadas com muitas partidas e paradas de uma mesma máquina, o que não é conveniente.

Por outro lado, a segunda forma de codificar o problema, bastante utilizada na literatura, é a formulação inteira, onde o cromossomo é composto por genes que representam a quantidade de máquinas em operação, numa determinada usina, em um intervalo de tempo. Essa codificação é, no entanto, mais apropriada quando todas as máquinas são iguais. Porém, pode-se notar que essa codificação reduz o espaço de busca (cromossomo com 48 genes, representando os 48 intervalos de tempo de um determinado dia), mas não resolve a questão de partidas e paradas, pois podem ser geradas, por exemplo, soluções associadas com 9 máquinas ligadas na hora 5, 7 máquinas na hora 6 e 10 na hora 7, dependendo do caso.

Diante do exposto e partindo-se do princípio de que, para um despacho típico da UHE-EC, a melhor solução está associada com pequenas variações na configuração que corresponde a todas as máquinas operando, foi utilizada uma codificação que está relacionada com o horário das mudanças de estado das máquinas. Essa abordagem foi realizada levando-se em consideração a necessidade de limitar o número de partidas e paradas dos geradores. Dessa forma, a codificação das variáveis utilizada no AG permite apenas soluções com, no máximo, duas mudanças de estado por máquina, para uma programação diária da operação. Isso gera um cromossomo com 20 genes e contribui para reduzir o campo de busca e, conseqüentemente, o número de soluções inviáveis.

Adicionalmente, para evitar que durante o processo de execução do AG sejam geradas soluções onde ocorram mudanças de estado de uma mesma máquina, em intervalos de tempo consecutivos, a variação mínima para uma segunda mudança foi definida como sendo de 3h.

Assim, partindo-se de um estado inicial obtido a partir da tabela de distribuição da geração, utilizada na UHE-EC, tem-se a seguinte estrutura para o cromossomo, conforme ilustra a Figura 3.

$n_1^{M_1}$	$n_2^{M_1}$	$n_1^{M_2}$	$n_2^{M_2}$...	$n_1^{M_{10}}$	$n_2^{M_{10}}$
-------------	-------------	-------------	-------------	-----	----------------	----------------

Figura 3. Estrutura do cromossomo.

onde

- $n_1^{M_i}$ corresponde ao intervalo de tempo da primeira mudança de estado da i -ésima máquina;
- $n_2^{M_i}$ corresponde ao número de intervalos de tempo após a primeira mudança, que a i -ésima máquina muda novamente de estado.

Dessa forma, levando-se em consideração, conforme mencionado anteriormente, que uma solução ideal é operar as máquinas sem muita mudança de estado, os limites inferiores e superiores, para o sorteio do AG foram definidos como:

1ª mudança de estado

A 1ª mudança pode ocorrer de duas formas, dependendo do estado inicial considerado. Portanto,

- a) Se $I_{M_i}^0 = 1$, então $1 \leq n_1^{M_i} \leq 128$.

Onde $I_{M_i}^0$ corresponde ao estado inicial da i -ésima máquina e os limites inferior e superior são, respectivamente, 1 e 128.

Nesse caso, se $n_1^{M_i} > 48$, sendo 48 o número de intervalos de tempo do dia (variação de 30 min), nenhuma mudança é efetuada e o valor obtido para $n_2^{M_i}$ é desconsiderado. Caso contrário, se $n_1^{M_i} \leq 48$, a máquina é desligada no período correspondente ao valor obtido para $n_1^{M_i}$ (1 para 00:30h, 2 para 01:00h, e assim por diante). Com isso, a segunda mudança de estado é avaliada. O intervalo 1 a 128 foi considerado de forma a permitir que uma máquina ligada tenha uma probabilidade menor de ser retirada de operação. Além disso, para adaptar essa codificação inteira em um AG binário, é necessário estabelecer os limites observando o número de bits mínimo para representá-los. Para 128 possibilidades, o número de bits necessários é igual a sete ($2^7 = 128$).

- b) Se $I_{M_i}^0 = 0$, então $1 \leq n_1^{M_i} \leq 64$

Da mesma forma, caso $n_1^{M_i} > 48$, nenhuma mudança é efetuada e $n_2^{M_i}$ não é avaliado. Nesse caso, como a máquina está desligada, o limite superior é reduzido de forma a aumentar a probabilidade do gerador entrar em operação novamente. Assim, foram usados seis bits para representar todas as possibilidades ($2^6 = 64$).

2ª mudança de estado

A segunda mudança de estado, também, ocorre de duas formas, de acordo com o estado inicial fornecido.

- a) Se $I_{M_i}^0 = 1$, então $6 \leq n_2^{M_i} \leq 69$

Para $n_1^{M_i} + n_2^{M_i} > 48$, a segunda mudança não ocorre. O limite inferior igual a 6 garante que a segunda mudança não acontece em um intervalo inferior a 3 horas (6 intervalos de 30 minutos) em relação à primeira.

- b) Se $I_{M_i}^0 = 0$, então $6 \leq n_2^{M_i} \leq 133$

Para $n_1^{M_i} + n_2^{M_i} > 48$, a segunda mudança, também, não ocorre. Para o caso de um estado inicial correspondendo a máquina desligada, a probabilidade dela mudar duas vezes de estado é pequena. Em outras palavras, se a máquina estava desligada, a probabilidade dela ligar é maior, como foi visto na primeira mudança de estado, porém é pequena a

possibilidade dela vir a ser desligada novamente, embora possa acontecer.

Com isso, de forma resumida, o objetivo dessa codificação, além de restringir o espaço de busca e impossibilitar partidas e paradas consecutivas, é permitir que, caso a máquina esteja desligada, exista uma probabilidade maior de ela entrar em operação. Caso a mesma esteja ligada, que a probabilidade dela ser desligada seja menor. Porém, vale destacar que a codificação permite ao AG encontrar soluções relacionadas com mudanças de estados, uma vez que para um determinado despacho, a solução ótima pode estar associada com algumas máquinas desligadas.

V. DESPACHO DE GERAÇÃO

O Despacho de Geração, por sua vez, consiste na determinação do ponto ótimo de operação associado com os geradores selecionados pelo Despacho de Máquinas ou pela experiência dos operadores, na abordagem heurística. Isso é feito através da solução de um Problema de Programação Não-Linear. A formulação do problema consiste, então, na minimização da função de perdas das unidades, sujeito as restrições existentes, como limites das máquinas e, também, do intercâmbio entre os barramentos de 138 e 230 kV. Dessa forma, com base na Figura 4, temos o seguinte objetivo:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{t=1}^{48} F_1[P_1^t] \cdot I_1^t + \dots + F_{10}[P_{10}^t] \cdot I_{10}^t \\ & \text{Sujeito a:} \\ & P_1^t \cdot I_1^t + \dots + P_4^t \cdot I_4^t + P_{transf}^t = P_{138kV}^t \\ & P_5^t \cdot I_5^t + \dots + P_{10}^t \cdot I_{10}^t - P_{transf}^t = P_{230kV}^t \\ & P_i^{\min} \cdot I_i^t \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \cdot I_i^t \\ & 0 \leq P_{transf}^t \leq P_{transf,Exp}^{\max} \\ & I_i^t \in \{0,1\} \\ & I_i^{t=0} \rightarrow \text{dado} \end{aligned} \quad (13)$$

onde

- P_i^t : potência gerada pela máquina i no intervalo t ;
- P_i^{\min} : potência mínima gerada pela máquina i ;
- P_i^{\max} : potência máxima gerada pela máquina i ;
- $F_i[P_i^t]$: Função de perdas na máquina i para uma potência gerada no intervalo t ;
- I_i^t : vetor de estados da máquina i no intervalo t ($1 =$ ligado, $0 =$ desligado)
- P_{transf}^t : Potência transferida do sistema de 230 kV para o de 138 kV no intervalo t ;
- $P_{transf,Exp}^{\max}$: Potência transferida máxima especificada do sistema de 230 kV para o de 138 kV;
- P_{138kV}^t : Potência injetada no sistema de 138 kV no intervalo t ;
- P_{230kV}^t : Potência injetada no sistema de 230 kV no intervalo t ;

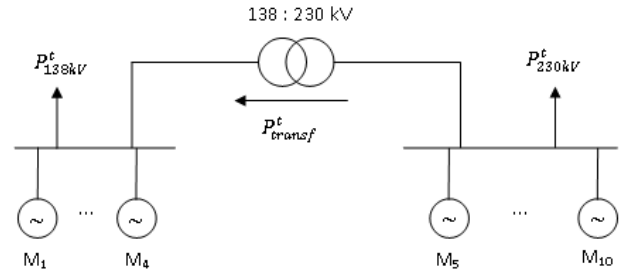


Figura 4. Diagrama unifilar representando a UHE-EC.

VI. CARACTERÍSTICAS DO SOFTWARE

Esta seção apresenta as principais telas da interface do software desenvolvido. Na Figura 5 é apresentada a tela de abertura do programa.

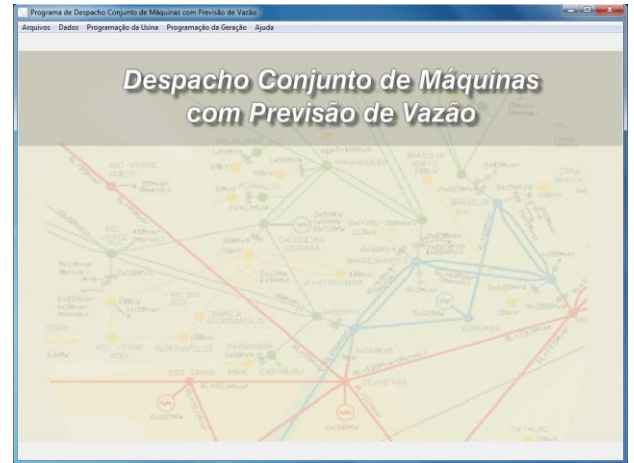


Figura 5. Tela de abertura

A primeira opção de entrada de dados do Menu Arquivos se refere ao Módulo para Programação da Usina, que tem como objetivo fornecer informações sobre a Programação Diária da Operação (PDO), além da variação do volume do reservatório, do vertimento em intervalos de 30 min, dentre outros. Para configurar o módulo em questão, são necessárias as seguintes informações:

- Vazão média prevista;
- Produtividade da usina (média ou por intervalo);
- Previsão de vazão em intervalos de 30 min;
- Limites de geração por intervalo de 30 min.

Essas informações podem ser carregadas através do Menu Arquivos, no item "Programação da Usina", na opção "Abrir Programação da Usina", por meio de um arquivo com extensão *.pru, previamente configurado. A estrutura desse arquivo é mostrada na Figura 6.

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
1600				
1339.0	250	290	0.223	
1339.0	250	290	0.223	
888.0	250	290	0.223	
888.0	250	290	0.223	
365.0	250	290	0.223	
365.0	250	290	0.223	
349.0	250	290	0.223	
349.0	250	290	0.223	
325.0	250	290	0.223	
325.0	250	290	0.223	
570.0	250	290	0.223	
570.0	250	290	0.223	
1371.0	290	350	0.223	
1371.0	290	350	0.223	
1681.0	390	470	0.223	
1681.0	390	470	0.223	
1950.0	470	570	0.223	
1950.0	470	570	0.223	
2124.0	470	570	0.223	
2124.0	470	570	0.223	
2703.0	470	570	0.223	
2703.0	470	570	0.223	
2719.0	470	570	0.223	
2719.0	470	570	0.223	
2220.0	470	570	0.223	
2220.0	470	570	0.223	
2536.0	470	570	0.223	
2536.0	470	570	0.223	
2838.0	470	570	0.223	
2838.0	470	570	0.223	
2758.0	470	570	0.223	
2758.0	470	570	0.223	
2743.0	470	570	0.223	
2743.0	470	570	0.223	
2576.0	470	570	0.223	
2576.0	470	570	0.223	
2750.0	470	570	0.223	
2750.0	470	570	0.223	
2711.0	470	570	0.223	
2711.0	470	570	0.223	
2790.0	470	570	0.223	
2790.0	470	570	0.223	
2767.0	470	570	0.223	
2767.0	470	570	0.223	
2029.0	470	570	0.223	
2029.0	470	570	0.223	
1458.5	470	570	0.223	
1458.5	470	570	0.223	

Figura 6. Dados para programação da usina

A Figura 7 apresenta a tela de edição de dados do Módulo para Programação da Usina, que tem como objetivo fornecer informações sobre a Programação Diária da Operação (PDO), além da variação do volume do reservatório, do vertimento em intervalos de 30 minutos, dentre outros.

Os resultados obtidos por meio da formulação matemática apresentada na Seção III podem ser visualizados na parte superior da tela mostrada na Figura 7. A interface permite, ainda, a visualização dos valores das seguintes variáveis:

- Variação do volume do reservatório para cada intervalo de 30 min;
- Vertimento para cada intervalo de 30 min;
- Geração total prevista;
- Vazão turbinada média prevista;
- Vazão deplecionada;
- Deplecionamento do reservatório;
- Rebaixamento do reservatório.

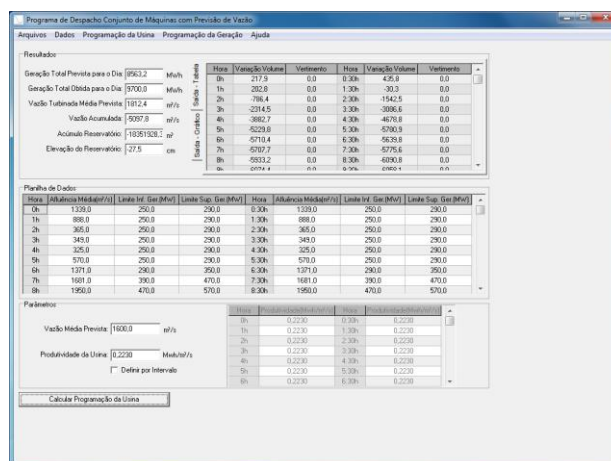


Figura 7. Edição da programação da usina.

A interface permite, ainda, a visualização dos valores da variação do volume do reservatório por meio de um gráfico, como mostra a Figura 8. Para isso, basta selecionar a aba “Saída – Gráfico” na janela da referida figura.

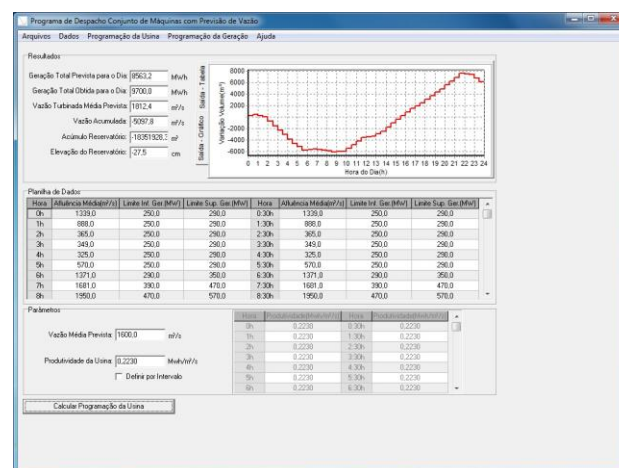


Figura 8. Variação do volume do reservatório em modo gráfico.

A Figura 9 apresenta a tela que permite a visualização e alteração das características técnicas das 10 máquinas da UHE-EC. Nessa tela são apresentadas as curvas de rendimento e perdas das máquinas, obtidas através de dados obtidas das respectivas curvas colina, funções representando as perdas hidráulicas, no canal de fuga, etc. Além da representação gráfica, a tela fornece também as expressões analíticas dessas curvas.

Embora o Módulo para Programação da Usina forneça automaticamente o valor de geração para os dois níveis de tensão (138 e 230 kV), segundo critérios estabelecidos, é possível configurar, também, os dados manualmente através do Módulo para Definição da Geração por Barramento. Para isso, basta acessar o menu Dados e selecionar a opção “Configurar Dados de Injeção de Potência”.

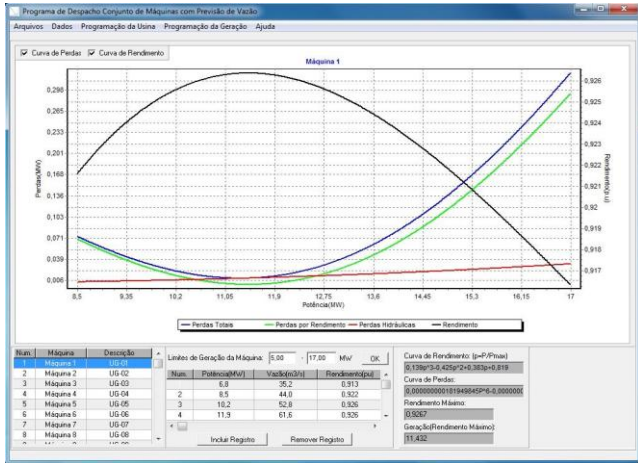


Figura 9. Módulo para configuração de máquinas.

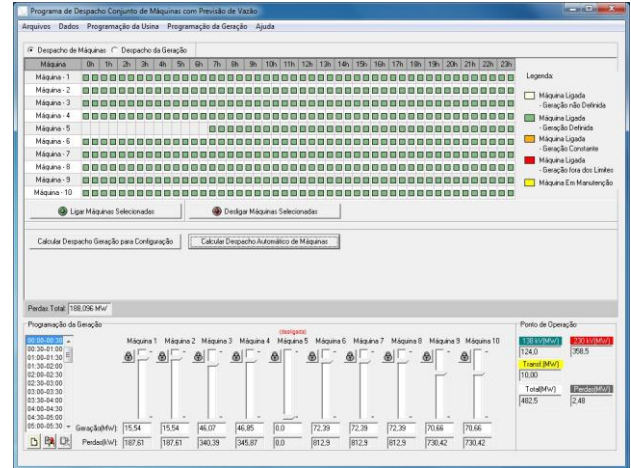


Figura 11. Resultado obtido com a utilização do Algoritmo Genético

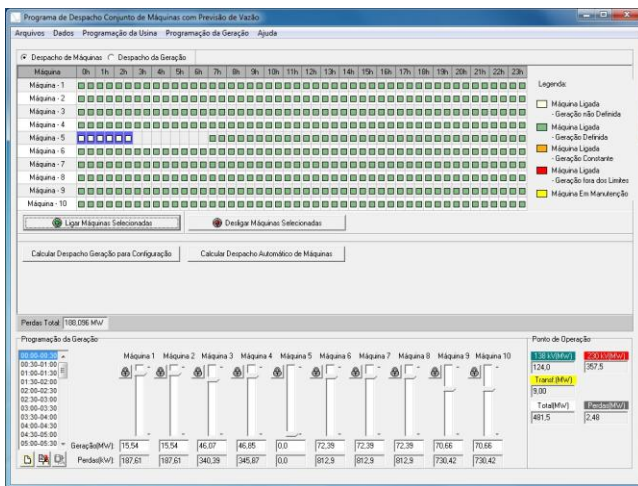


Figura 10. Despacho de Máquinas e de Geração com AG.

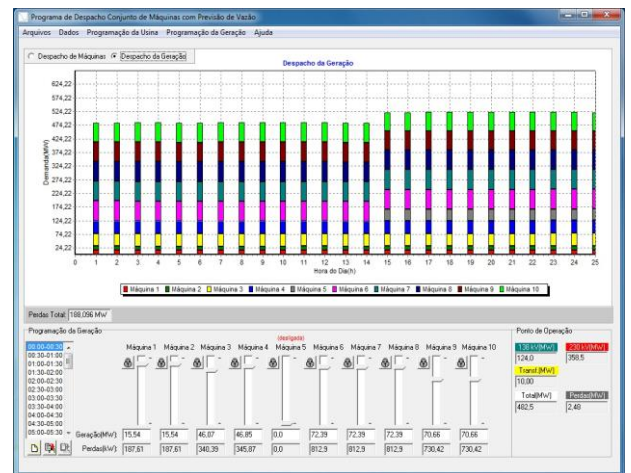


Figura 12. Visão gráfica do módulo para despacho de máquinas e geração.

A Figura 10 mostra a tela utilizada para especificar a execução dos Módulos de Despacho de Máquinas e Despacho de Geração. Na opção da Abordagem Heurística, o usuário seleciona as máquinas em operação em cada intervalo de tempo e executa o Despacho de Geração para calcular a geração de cada máquina em operação.

Na opção da Abordagem Meta-Heurística, a programação da geração é obtida de forma totalmente automática. A seleção do despacho de máquinas e despacho de geração, feito automaticamente, é obtida pressionando-se o botão “Calcular Despacho Automático de Máquinas”. Com isso, o Algoritmo Genético será executado e a melhor solução encontrada será apresentada. Na Figura 11 é mostrado o resultado de um exemplo obtido com a utilização do Algoritmo Genético.

A interface possibilita, também, uma visão gráfica (gráfico de barras) do despacho da usina, conforme apresentado na Figura 12. Nessa tela também existem várias facilidades para fixação de valores do despacho de geração.

Além do despacho totalmente automático, é possível configurar manualmente as máquinas que deverão operar em cada intervalo de tempo. Isso pode ser feito antes ou após a utilização do Algoritmo Genético. Para isso, basta selecionar as máquinas desejadas e o respectivo período que a mesma deve estar operando.

O processo de simulação, por meio do AG, descrito anteriormente, pode ser configurado de forma que manutenções previstas sejam incluídas como restrições na busca pela melhor configuração, no despacho de máquinas. Assim, para que o AG não produza configurações envolvendo máquinas em manutenção, o programa considera as seguintes informações:

- Máquinas em manutenção;
- Hora de início do período de manutenção, para cada máquina que estará fora de operação;
- Última hora de manutenção de cada máquina fora de operação;
- Número de horas que cada máquina deve operar em potência máxima após manutenção (Valor Padrão: 4h).

Essas informações entram como restrições para o AG, sendo considerado que fora do horário inicial e final estabelecido para a manutenção, as máquinas encontram-se em operação e a configuração inicial corresponde à máquina ligada. Com isso, as configurações das máquinas em manutenção são determinadas previamente pelo operador e ficam fixas durante a execução do AG, que atuará somente para as demais unidades.

Finalmente, vale destacar que o programa permite fixar a geração de uma ou mais máquinas, de forma similar ao caso da manutenção. Para isso, basta pressionar o botão direito do mouse e escolher a opção “Definir Geração Constante para a Máquina”. Uma janela surgirá na tela, permitindo que o usuário entre com o valor de geração desejado, para cada máquina selecionada.

VII. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu o produto desenvolvido no projeto de pesquisa e desenvolvimento *Despacho Conjunto de Máquinas com Previsão de Vazão* executado pela COPPE/UFRJ para a Endesa Geração Brasil. No artigo foram apresentados a metodologia utilizada e o software desenvolvido. Os resultados obtidos no projeto contemplaram todas as etapas previstas no projeto. O software desenvolvido encontra-se em utilização pela equipe da Endesa.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] C.T. Salmazo, S. Soares, "Minimum Loss Predispatch Model for Hydroelectric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 3, August 1997.
- [2] Arce, T. Ohishi, S. Soares, "Optimal Dispatch of Generating Units of the Itaipú Hydroelectric Plant", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 1, February 2002.
- [3] S.O. Rezende, *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações*, Editora Manole Ltda., 2005.
- [4] K.Y. Lee, M.A. El-Sharkawi, *Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems*, IEEE Power Engineering Society, 2002.
- [5] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [6] D.M. Falcão et al., “Relatório 1 do Projeto Despacho Conjunto de Máquinas com Previsão de Vazão”, Fundação Coppetec, Outubro de 2008.
- [7] D.M. Falcão et al., “Relatório 2 do Projeto Despacho Conjunto de Máquinas com Previsão de Vazão”, Fundação Coppetec, Março de 2009.
- [8] D.M. Falcão et al., “Relatório 3 do Projeto Despacho Conjunto de Máquinas com Previsão de Vazão”, Fundação Coppetec, Setembro de 2009.