

08 a 11 de Outubro de 2019  
Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora - MG

## UM CASO DE ESTUDO COMPUTACIONAL PARA O DESPACHO ELÉTRICO DE UM MODELO HIDROTÉRMICO

**Jefferson Bezerra dos Santos**<sup>1</sup> - jeffersonsantos@ppgmmc.ci.ufpb.br

**Camila Mara Vital Barros**<sup>2</sup> - camila.barros@ci.ufpb.br

**Sérgio de Carvalho Bezerra**<sup>3</sup> - sergio@ci.ufpb.br

- <sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Centro de Informática, Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa, PB, Brasil.
- <sup>2</sup> Departamento de Sistemas de Computação, Centro de Informática, Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa, PB, Brasil.
- <sup>3</sup> Departamento de Sistemas de Computação, Centro de Informática, Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa, PB, Brasil.

**Resumo.** Com o aumento da demanda por energia elétrica e o apelo das fontes renováveis, grandes avanços tecnológicos são indispensáveis para um crescimento eficiente e sustentável. No Brasil a hidrelétrica é a principal fonte de geração de energia. No entanto, devido ao aumento desproporcional da demanda e a escassez de chuvas, tem sido necessário a ativação de termelétricas para suprir a demanda. Consequentemente, isto acarreta em um aumento na fatura dos consumidores residenciais. Neste contexto, este trabalho tem como finalidade analisar, as consequências que o aumento da demanda e variações de produtividade associados a problemas energéticos, podem ocasionar no gerenciamento do balanço energético. Vislumbrando a necessidade de realizar um gerenciamento adequado do despacho de energia, de modo a minimizar os custos da geração e uma diminuição do impacto ambiental, neste trabalho foi proposto um estudo baseado em Programação Dinâmica Dual Estocástica para sistemas hidrotérmicos (hidrelétricas e termelétricas). De fato, ao variar a produtividade e a demanda se identifica qual a configuração de despacho que apresenta o menor custo esperado para a geração do sistema.

**Palavras-chave:** Geração de Energia, Demanda, Modelo Hidrotérmico, Planejamento, Programação Dinâmica Dual Estocástica.

### 1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade pelo atendimento à demanda tem ocasionado um aumento da complexidade dos sistemas de geração de energia elétrica. Em contrapartida, a pesquisa por uma geração de energia que favoreça o desenvolvimento sustentável tornou-se um dos principais temas debatidos no cenário internacional. O sistema brasileiro é constituído predominantemente por um sistema interligado hidrotérmico, tendo como características principais o intercâmbio de energia entre regiões e a possibilidade de complementaridade existente entre as hidrelétricas

e as termelétricas (Tolmasquim, 2016). Em um planejamento hidrotérmico os aspectos de relevância são: acoplamento espacial, acoplamento temporal e a estocasticidade dos reservatórios. Em cada estágio do planejamento é necessária a tomada de decisão fazendo-se a escolha pela quantidade gerada de energia proveniente das termelétricas e das hidrelétricas. Neste contexto, atualmente destaca-se a Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), pois possibilita uma flexibilidade para a descrição do acoplamento temporal e espacial existente entre as usinas hidrelétricas, além de permitir o planejamento em vários cenários de afluições proporcionando-se a modelagem da incerteza dos reservatórios. Contudo, dependendo do número elevado e das quantidades de cenários para o planejamento nem sempre é possível que a técnica de PDDE obtenha uma configuração ótima para todos os cenários considerados, tornando-se sua principal desvantagem.

Diversos trabalhos na literatura utilizam a PDDE como forma de planejamento. Um estudo recente da técnica de construção de árvore cenários para a PDDE pode ser encontrado em (Rebennack, 2016). O estudo sobre modelagem hidrotérmica não convexa utilizando PDDE para restrições não lineares envolvendo reservatórios de hidrelétricas é encontrado em (Cerisola & Latorre & Ramos, 2011). E uma análise comparativa entre Programação Dinâmica Primal Estocástica e PDDE para modelo hidrotérmico de longo prazo é descrita em (Martinez & Soares, 2004).

Neste trabalho propõe-se a analisar os pontos críticos de demanda e de produtividade em modelos hidrotérmicos que utilizam a PDDE. Tendo como intuito verificar quais as consequências nas variações da demanda e da produtividade no valor total do custo esperado. Vale destacar a obtenção de duas configurações de despacho considerando-se o aspecto macro, ou seja, ordem de acionamento das hidrelétricas e das termelétricas, com o aumento da demanda e dos níveis de produtividade. Ao final se detecta qual cenário apresenta o menor custo esperado de produção de geração de energia elétrica, dentro das situações modeladas.

Este trabalho é subdividido da seguinte maneira: Na Seção 2 foi abordada a configuração do despacho do Brasil; Na seção 3 é abordada a Programação Dinâmica Dual Estocástica; Na seção 4 é abordada a análise das simulações; Na seção 5 as conclusões e trabalhos futuros.

## **2. DESPACHO DE ENERGIA**

A análise dos fatores que envolvem a matriz energética brasileira sobre os aspectos relacionados à demanda e a oferta possui um grau de complexidade elevado. Um dos principais elementos que ocasionam empecilhos é a dependência hídrica que ocorre no setor energético brasileiro (Tolmasquim, 2016). O Brasil possui o Sistema Interligado Nacional (SIN) que corresponde as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte. Sendo este, responsável por gerar cerca de 96,6% de toda a capacidade de produção de energia do Brasil (Atlas de energia elétrica no Brasil, 2008). Uma das vantagens da adoção do SIN deve-se a possibilidade de intercâmbio energético, isto é, regiões que sofrem com problemas no abastecimento de energia devido a algum motivo externo podem ser auxiliadas por outras regiões. Uma outra possibilidade é a operação de usinas hidrelétricas e termelétricas no regime de complementaridade, ou seja, as termelétricas são ativadas para suprir demanda quando por algum motivo as hidrelétricas não conseguem atingir a meta, evitando-se prejuízos na oferta. O sistema de energia brasileiro também é constituído pelos sistemas isolados localizados principalmente na região Norte, estados como Amazonas, Roraima, Acre, Amapá e Rondônia. Esta denominação deve-se por não estarem interligados ao SIN e por não permitirem um intercâmbio com outras

regiões devido as características geográficas. O funcionamento dos sistemas isolados é predominantemente térmico. Os custos para a geração de energia nesses sistemas são superiores ao SIN (Atlas de energia elétrica no Brasil, 2008).

A produção de eletricidade no sistema brasileiro tem como objetivo principal minimizar os custos de operação e garantir o suprimento de energia em todo o país (Tolmasquim, 2016). Devido ao SIN ser constituído predominantemente por um sistema hidrotérmico este é afetado pela incerteza associada à pluviosidade das regiões que o constituem (Atlas de energia elétrica no Brasil, 2008). No entanto, a demanda do sistema deve ser garantida de forma a não prejudicar o abastecimento, ao mesmo tempo a geração termelétrica associada aos sistemas isolados possui um custo elevado. Este custo deve ser considerado para não ocasionar um aumento desagradável no preço associado ao sistema de energia brasileiro. Neste contexto, o planejamento eficiente do sistema energético observando características como, demanda, oferta e as configurações do sistema é conhecido na literatura como o despacho de energia. Para sistemas hidrotérmicos as características do despacho podem ser resumidas no dilema do “operador” dado pelo diagrama a seguir.

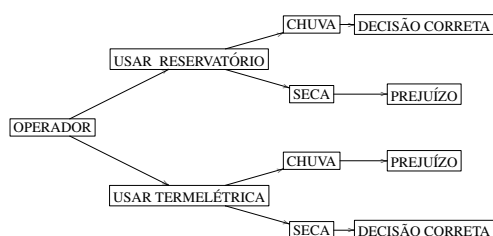


Figura 1- Dilema do operador.

Conforme o diagrama o operador do sistema pode ter prejuízo associado a sua escolha dada a estocasticidade dos reservatórios das hidrelétricas. Dada a complexidade do sistema hidrotérmico brasileiro este tipo de decisão possui um grau de dificuldade que transcende a simplicidade. Nesta perspectiva um dos modelos de planejamento desenvolvido para lidar com a tomada de decisão de curto prazo foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), o chamado Modelo de Planejamento de Sistemas Interligados de Curto Prazo (DE-COMP). Esse modelo fundamenta-se na técnica conhecida na literatura como Programação Dinâmica Dual Estocástica.

### 3. Programação Dinâmica Dual Estocástica

#### 3.1 Otimização

No planejamento de um sistema energético hidrotérmico o sistema deve preservar as metas de geração para suprir a demanda e minimizar o valor esperado do custo de operação ao longo do período de estudo. As características mencionadas configuram o despacho de energia. Dadas as possibilidades de configurações possíveis para o sistema (sequência de acionamento das hidrelétricas e das termelétricas com o aumento da demanda para uma produtividade fixa) deseja-se obter a combinação na qual o valor do custo associado seja mínimo. Portanto, o despacho de energia trata-se de um problema de otimização. No estudo da teoria da otimização existe uma função  $f$  ao qual intenta-se obter quando possível seu minimizador (Izmailov & Solodov, 2014). Um entendimento intuitivo pode ser dado pelas figuras a seguir:

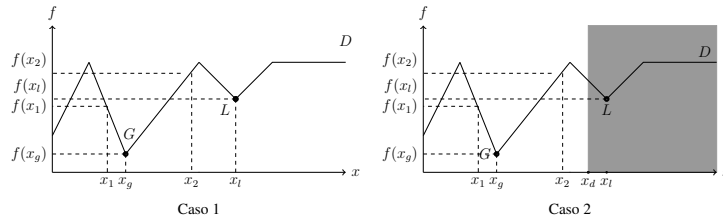


Figura 2- Minizador  $G$ , minimizador  $L$  e Conjunto  $D$ .

Analisando a Figura (2) nota-se dois casos específicos: em cada caso o que muda é o domínio da regra de associação, esse domínio é o conjunto viável. Para o primeiro caso é verdadeira a afirmação  $f(x_g) \leq f(x)$  para qualquer  $x$  do domínio maximal. No segundo caso, se restringe o domínio, ou seja, muda-se o conjunto viável (para valores de  $x$  pertencentes ao conjunto cinza da Figura (2)). No segundo caso da Figura (2) percebe a mudança do conjunto viável o que implica ser o ponto  $L$  o novo minimizador, para o novo conjunto viável. Pois,  $f(x_l) \leq f(x)$  para todo  $x$  no segundo conjunto viável. O minimizador do problema de otimização dado o conjunto viável  $D$  é conhecido como ponto de ótimo. Sua nomenclatura comum é dada por  $x^*$ . De forma equivalente pode-se representar o problema por,

$$\min_{x \in D} f(x), \quad (1)$$

onde  $x^*$  satisfaz:

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ para } x \in D.$$

Para o presente estudo é suficiente considerar o conjunto  $D$  como sendo um conjunto poliedral. De uma forma bem grosseira, a ideia é evitar possíveis “fissuras” em nosso conjunto de restrições. Um conjunto é dito poliedral quando se pode representá-lo como um conjunto de soluções de um sistema finito de equações e inequações lineares (Izmailov & Solodov, 2014). Por exemplo,

$$D = \{x \in \mathbb{R}^n; Ax = a, Bx \leq b\},$$

onde  $A \in R(l, m)$ ,  $B \in R(m, n)$ ,  $a \in \mathbb{R}^n$ , e  $b \in \mathbb{R}^m$  adotando-se que  $R(l, m)$  representa o espaço de matrizes com  $l$  linhas, e  $m$  colunas. Dada que  $f$  na Eq.(1) é uma função linear e  $D$  um conjunto poliedral. Então, na Teoria de otimização, tais problemas são denotados ser Problemas de Programação Linear. O problema de despacho de energia, para o caso determinístico pertence a essa categoria. Por fim, para problemas de otimização de uma forma geral o conceito de dualidade é indispensável. Considerando-se um problema de Programação Linear que será chamado de problema primal,

$$\min_{x \in D = \{x \in \mathbb{R}^n; Bx \geq b\}} \langle c, x \rangle, \quad (2)$$

onde  $B \in R(m, n)$ ,  $c \in \mathbb{R}^n$  e  $b \in \mathbb{R}^m$  onde “ $\langle \rangle$ ”, representar o produto interno Euclidiano. O problema dual para Eq. (2) é definido por,

$$\max_{\mu \in \Delta = \{\mu \in \mathbb{R}_+^m; B^T \mu = c\}} \langle b, \mu \rangle. \quad (3)$$

A grande importância da dualidade para a Programação Linear deve-se ao fato que em certas circunstâncias o valor ótimo do problema dual é equivalente ao do problema primal e na maioria dos casos o problema dual possui uma estrutura menos complexa (Izmailov & Solodov, 2014). Uma vez que o instrumentário necessário foi desenvolvido pela teoria de otimização. Assim, pode-se estudar o problema do despacho de energia usando o (DECOMP).

### 3.2 Modelo de Planejamento de Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Curto Prazo

O despacho de energia em sistemas hidrotérmicos envolve um conjunto de fatores que dificultam a tomada de decisão, não somente os níveis dos reservatórios devem ser considerados, mas também o acoplamento espacial existente entre as usinas hidrelétricas. Consequentemente, usinas a jusante possuem dependência de usinas a montante e o acoplamento temporal, isto é, decisões no momento de planejamento podem ocasionar consequências no futuro, tais fatores precisam ser observados para o despacho hidrotérmico. A figura a seguir representa a relação existente entre as usinas.

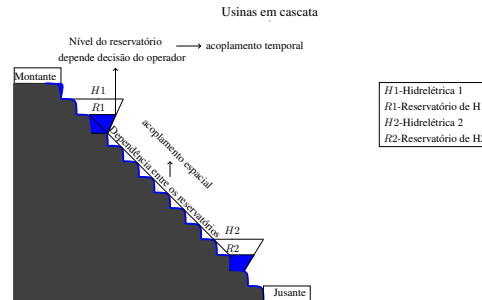


Figura 3- Representação do acoplamento espacial e temporal.

Nesse contexto, foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) o DECOMP. Sua estrutura utiliza a Programação Dinâmica Dual Estocástica. Primeiramente, considera-se o caso determinístico supondo um problema de operação em dois estágios de tal forma que afluência em cada usina hidrelétrica em qualquer estágio do tempo é conhecida (DECOMP, 2001). De tal forma, podendo modelar o problema por:

$$\begin{aligned} & \min \langle c_1, x_1 \rangle + \langle c_2, x_2 \rangle \\ & \text{tal que: } A_1 x_1 \geq b_1 \\ & E_1 x_1 + A_2 x_2 \geq b_2 \end{aligned} \quad (4)$$

- $c_1$  e  $c_2$  são vetores que representam os custos relacionado aos estágios 1 e 2 respectivamente;
- $x_1$  e  $x_2$  são vetores que representam as decisões tomadas nos estágios 1 e 2 respectivamente;
- $b_1$  e  $b_2$  são os vetores de recursos nos estágios 1 e 2 respectivamente;
- $A_1$  e  $A_2$  são matrizes que representam o acoplamento espacial;
- $E_1$  é uma matriz que descreve o acoplamento temporal.
- De fato, tome  $c = (c_1, c_2)$  e  $x = (x_1, x_2)$ .

Este tipo de problema pode ser interpretado como uma decisão em dois estágios para sua resolução é escolhida uma decisão viável  $x_1$  denotada por  $x_1^*$  de tal forma que  $A_1 x_1^* \geq b_1$ . Assim, o problema para decisão do estágio 2 pode ser reescrito como,

$$\begin{aligned} & \min \langle c_2, x_2 \rangle \\ & \text{tal que: } A_2 x_2 \geq b_2 - E_1 x_1^* \end{aligned} \quad (5)$$

onde a Eq. (5) é um problema de Programação Linear e  $x_1^*$  é conhecido. Uma vez representadas as decisões viáveis tomadas no estágio 1 do problema o intuito é minimizar o custo da função objetivo para o estágio 2. Dado que  $x_1^*$  é viável procura-se uma solução ótima para  $x_2$  representado por  $x_2^*$ . A solução do estágio 2 depende das decisões tomadas no estágio 1. Portanto, o problema do estágio 2 pode ser visto como uma função do 1 estágio, isto é,

$$\alpha_1(x_1) = \min \langle c_2, x_2 \rangle$$

$$\text{tal que: } A_2 x_2 \geq b_2 - E_1 x_1^* \quad (6)$$

onde  $\alpha_1$  representa o valor ótimo para o estágio 2. A Eq.(4) pode ser reescrita como se segue,

$$\min \langle c_1, x_1 \rangle + \alpha_1(x_1)$$

$$\text{tal que: } A_1 x_1 \geq b_1. \quad (7)$$

Aplicando a dualidade na Eq.(5) é imediato que,

$$\alpha_1(x_1) = \max \pi (b_2 - E_1 x_1)$$

$$\text{tal que: } \pi A_2 \leq c_2. \quad (8)$$

Nas circunstâncias do problema a solução da Eq.(8) é equivalente a Eq.(5) nota-se que o conjunto viável  $\pi A_2 \leq c_2$  da Eq.(8) não depende do valor de  $x_1$ . Desta forma, os pontos extremos ou vértices do conjunto viável podem ser caracterizados por  $\pi = \{\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^P\}$ . Uma vez que a solução de um problema de Programação Linear corresponde a um vértice do conjunto viável, portanto a Eq.(8) pode ser reescrita como se segue,

$$\alpha_1(x_1) = \max \pi^i (b_2 - E_1 x_1)$$

$$\pi^1 \in \{\pi^1, \pi^2, \dots, \pi^P\}$$

por fim, a Eq.(8) pode ser reescrita para,

$$\alpha_1(x_1) = \min \alpha$$

$$\text{tais que: } \alpha \geq \pi^i (b_2 - E_1 x_1),$$

$$\text{com } i = 1, 2, \dots, P \quad (9)$$

onde  $\alpha$  é uma variável escalar. Por fim a Eq.(4) torna-se

$$\min \langle c_1, x_1 \rangle + \alpha$$

$$\text{tal que: } A_1 x_1 \geq b_1$$

$$\pi^i (b_2 - E_1 x_1) - \alpha \leq 0$$

$$\text{para } i = 1, 2, \dots, P. \quad (10)$$

A técnica para problemas determinísticos utilizada é conhecida na literatura como a decomposição de Benders (Benders, 1962) construindo um algoritmo iterativo na busca da solução do problema. A PDDE nada mais é que uma aplicação da decomposição de Benders em um problema cuja a natureza é estocástica. Considerando-se o problema de dois estágios similar ao caso anterior, contudo o estágio 2 depende dos valores que uma ou mais variáveis aleatórias podem assumir. Por exemplo, assumo que o vetor  $b$  pode assumir dois valores  $b_1$  e  $b_2$  com probabilidades  $p_1$  e  $p_2$  respectivamente, sendo  $(p_1 + p_2 = 1)$  (DECOMP, 2001). O objetivo é encontrar a estratégia que minimiza o valor do custo esperado. Lembrando, a esperança é a média ponderada dos valores que a variável assume e suas respectivas probabilidades. Portanto, o problema fica modelado por:

$$z = \min \langle c_1, x_1 \rangle + p_1 \langle c_2, x_{21} \rangle + p_2 \langle c_2, x_{22} \rangle$$

$$\text{tal que: } A_1 x_1 \geq b_1$$

$$E_1 x_1 + A_2 x_{21} \geq b_{21}$$

$$E_1 x_1 + A_2 x_{22} \geq b_{22} \quad (11)$$

Este problema poder ser reescrito como,

$$\begin{aligned} z &= \min \langle c_1, x_1 \rangle + p_1 \omega_{21} + p_2 \omega_{22} \\ A_1 x_1 &\geq b_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \omega_{21}(x_1) &= \min \langle c_2 x_{21} \rangle \\ A_2 x_{21} &\geq b_{21} - E_1 x_1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \omega_{22}(x_1) &= \min \langle c_2, x_{22} \rangle \\ A_2 x_{22} &\geq b_{22} - E_1 x_1. \end{aligned} \quad (14)$$

Em seguida, aplicando a decomposição de (Benders, 1962) em  $\omega_{21}$  e  $\omega_{22}$  obtem-se:

$$\begin{aligned} \omega_{21}(x_1) &= \min \beta_1 \\ \text{tal que: } \beta_1 &\geq \pi_1^i b_{21} - E_1 x_1 \\ \text{para } i &= 1, 2, \dots, P \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \omega_{22}(x_1) &= \min \beta_2 \\ \beta_1 &\geq \pi_2^i b_{22} - E_1 x_1 \\ \text{para } i &= 1, 2, \dots, P \end{aligned} \quad (16)$$

de maneira análoga ao caso anterior pode-se escrever o problema original estocástico como,

$$\begin{aligned} \min_{s \setminus a} \quad & \langle c_1, x_1 \rangle + p_1 \beta_1 + p_2 \beta_2 \\ & A_1 x_1 \geq b_1 \\ & \pi_1^i (b_{21} - E_1 x_1) - \beta_1 \leq 0 \\ & \pi_2^j (b_{22} - E_1 x_1) - \beta_2 \leq 0 \\ & i = 1, 2, \dots, P \\ & j = 1, 2, \dots, P. \end{aligned} \quad (17)$$

Em poucas linhas, a PDDE faz uma decomposição no problema original utilizando-se os princípios de dualidade e a decomposição de Benders (Benders, 1962). Isto permite a resolução do problema original, a partir da solução de outro problema. Contudo, este último possui um melhor tratamento computacional, sendo possível analisar a influência da demanda em sistemas hidrotérmicos para vários cenários. A função a minimizar é o custo esperado. As restrições do problema variam em função da produtibilidade e da demanda. No nosso modelo se constatou a existência de duas possíveis sequências de acionamento das hidrelétricas e termelétricas, ao aumentarmos a demanda, para uma produtibilidade fixa. Por fim, avalia-se qual situação apresenta o menor custo esperado. Os dados e os arquivos necessários para o modelo podem ser encontrados na página do projeto no GitHub, o link pode ser encontrado nas referências.

#### 4. ANÁLISE DO DESPACHO HIDROTÉRMICO

A simulação foi constituída para um sistema hidrotérmico de duas usinas hidrelétricas em cascata H1 e H2 com duas termelétricas associadas T1 e T2, para dois cenários com probabilidade  $p$  e  $1 - p$  respectivamente. O sistema deve manter a demanda dada por,

$$\rho_1 * VTH1 + \rho_2 * VTH2 + G1 + G2 = DEMANDA, \quad (18)$$

onde  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são os índices de produtibilidade das usinas H1 e H2, VTH1 e VTH2 os volumes turbinados de H1 e H2 e G1 e G2 a produção das termelétricas T1 e T2 respectivamente e considerando-se o balanço hídrico,

$$Vt = VI + VIC - (VT + VV), \quad (19)$$

onde  $V_t$  representar volume em qualquer instante de tempo,  $V_I$  volume inicial,  $V_{IC}$  volume incremental,  $V_V$  volume vertido e  $V_T$  volume turbinado. Uma perspectiva geral é dada pela figura a seguir considerando-se uma simulação de curto prazo para uma semana de planejamento.

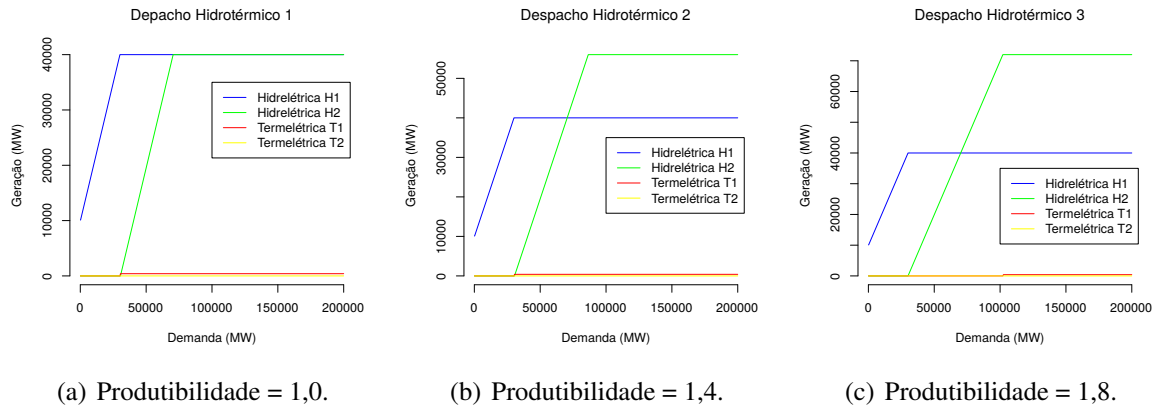


Figura 4- Configuração de despacho para  $p = 0, 1$  e  $1 - p = 0, 9$ .

A Figura (4) é constituída por configurações distintas de planejamento que estão associados a produtividade das usinas hidrelétricas. Na Figura (4a) nota-se uma geração predominantemente da hidrelétrica H1 para um intervalo inicial de demanda. Entretanto, a medida que o aumento de demanda torna-se significativo para o sistema ocorre a ativação da Hidrelétrica H2 e da termelétrica T1. Observa-se que ocorre um aumento da geração de H2 e a geração de T1 permanece constante no período de estudo. A Figura (4b) possui semelhança ao caso anterior, porém o principal aspecto relevante deve-se a vasta utilização da geração de H2 para essa configuração de despacho. Por fim, a Figura (4c) possui ampla geração de H2. Contudo, sua principal característica é ativação posterior de T1 em comparação aos outros casos. Em resumo, de acordo com a Figura (4), a medida que ocorre uma alteração na produtividade de H1 e o sistema sofre uma aumento na demanda, o arranjo da geração é alterado. A análise sobre o impacto que ocorre com o custo em relação a demanda para configurações de produtividade é dado a seguir.

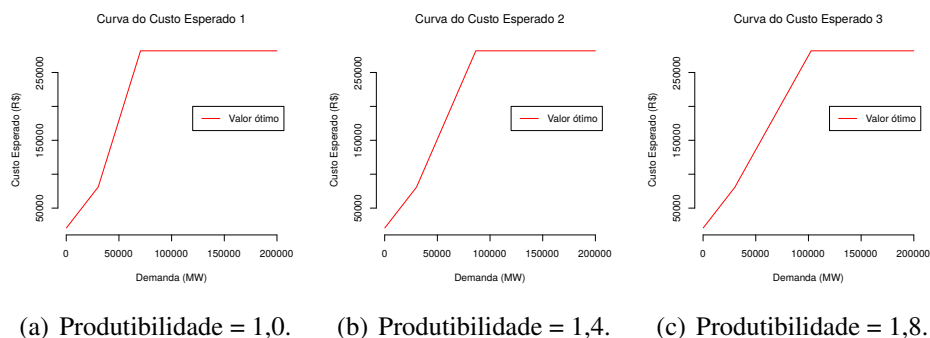


Figura 5- Relação entre demanda e custo esperado  $p = 0, 1$  e  $1 - p = 0, 9$ .

Conforme descrito em Figura (5), as configurações de produtividade para aumento da demanda tiveram um impacto considerável no valor de custo. De fato, percebe-se uma suavização da curva do valor ótimo para o custo associado ao sistema. No primeiro momento ocorre um



crescimento simétrico em ambos os casos descritos na Figura (5). Porém, a medida que ocorre uma crescimento na demanda. Em determinada ocasião nota-se uma ruptura na simetria da curva ocorrendo um aumento do custo. Posteriormente, o equilíbrio é atingido. A configuração da produtibilidade considerada de maior importância para o despacho hidrotérmico é a encontrada em Figura (4c) também descrita em Figura (5c). Pois, nota-se uma adaptação favorável do sistema pelo aspecto do custo, uma vez que pela suavização ocorrida evita-se aumentos inesperados. O segundo ponto é a relevância ambiental associada com o uso das termelétricas. Visto que, a termelétrica T1 é ativada em um período posterior em relação as outras configurações. Desta forma, o sistema utilizando-se da configuração na Figura (4) manteve-se em condições de adaptações para o aumento na demanda. Vale salientar, que a ruptura observada na Figura (4) em todos casos deve-se ao ônus da ativação de T1. Para a presente análise considerou-se vários outros cenários com probabilidades distintas. Contudo, pelos resultados no aspecto geral serem semelhantes esses cenários não foram descritos no presente trabalho. Por fim, a figura a seguir descreve de forma básica as configurações encontradas. A configuração satisfatória é a segunda.

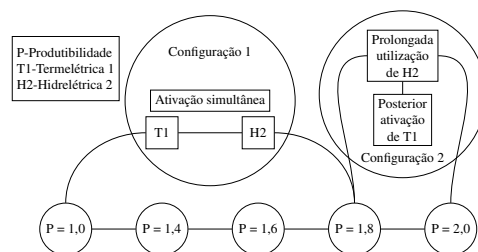


Figura 6- Configurações para o despacho hidrotérmico.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento de um sistema hidrotérmico sobre as variações na demanda com relação as produtibilidades distintas para a descrição do despacho hidrotérmico, na qual a técnica utilizada foi a Programação Dinâmica Dual Estocástica. O sistema foi estruturado com duas hidrelétricas em cascata H1 e H2 e duas termelétricas associadas T1 e T2. Após a análise dos resultados pôde-se verificar que as variações na demanda podem alterar significativamente o comportamento de sistemas hidrotérmicos. Pois, aumentos significativos ocasionaram a ruptura da curva de custo esperado. O principal motivo deve-se ao ônus do custo associado a geração da termelétrica T1. Entretanto, dada a configuração das produtibilidades das usinas percebeu-se uma mudança no comportamento do sistema notando-se duas configurações distintas. Para um produtividade baixa notou-se a ativação simultânea de T1 e de H2. Por outro lado, com uma produtividade elevada o sistema manteve-se com a geração das hidrelétricas H1 e H2 evitando-se a ativação das termelétricas associadas T1 e T2. A segunda configuração considerou-se favorável principalmente pela ativação tardia de T1 evitando-se prejuízos ambientais e o aumento no custo esperado. Este trabalho se justifica pela necessidade do planejamento energético no intuito do uso eficiente da energia e na perspectiva do desenvolvimento sustentável. Por fim, este trabalho está longe de ser um estudo completo sobre o despacho hidrotérmico, uma vez que muitas melhorias podem ser feitas. Por exemplo, análise dos volumes iniciais das usinas hidrelétricas para diminuição da necessidade de um

produtibilidade elevada para uma adaptação favorável do sistema. Além de considerar fontes renováveis como a eólica e a solar no modelamento.

## REFERÊNCIAS

- Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008, 3.ed., Brasília. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>. Acesso em: 15 de Ago. 2019.
- Benders, J. F. *Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problem*. Numerische Mathematik, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01386316>. Acesso em: 15 de Ago. de 2019.
- Cerisola, S.; Latorre, J.M; Ramos, A. *Stochastic dual dynamic programming applied to nonconvex hydrothermal models*. *European Journal of Operational Research*, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221711010496>. Acesso em: 14 de Ago. de 2019.
- Izmailov, A.; Solov, M. *Otimização volume 1. Condições de otimalidade, Elementos de Análise Convexa e de Dualidade*. 3 ed, Rio de Janeiro: IMPA, 2014.
- Martinez, L.; Soares, S. *Primal and dual stochastic dynamic programming in long term hydrothermal scheduling*. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1397703>. Acesso em: 15 de Ago. 2019.
- Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Curto Prazo: Manual de referência. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2001. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/arquivos/pdf/Manual.Referencia\\_DECOMP.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/arquivos/pdf/Manual.Referencia_DECOMP.pdf). Acesso em: 15 de Ago. 2019.
- Rebennack, S. *Combining sampling-based and scenario-based nested Benders decomposition methods: application to stochastic dual dynamic programming*, 2016. *Mathematical Programming*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10107-015-0884-3>. Acesso em: 14 de ago. de 2019.
- Tolmasquim, M. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. EPE: Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 17 de Ago. 2019.
- Santos, J.B. *Despacho Hidrotérmico de Energia*. Disponível em: <https://github.com/Jeffreypir/Modelagem>. Acesso em: 20 de Ago. de 2019.

## A COMPUTATIONAL CASE OF STUDY FOR ELECTRIC DISPATCH IN A HYDROTHERMAL MODEL

**Abstract.** *In the last decades, the demands for renewable sources of electrical energy have increased. Hence, big technological advances have been essential, in order to have an efficient and sustainable electrical system. In Brazil, the hydroelectric source is the most important one. However, the unproportional demands and the low level of water reservoir have implied to use thermoelectric source. Therefore, who pay the bill are the costumers. With this in mind, this work has as goals: to analyze the consequences with the demands increasing and changes of producibility, in the scenario of energetic problems and which can be induced in the energetic balance. The most important point must be to foresee how to manage the energetic system which we call the electric dispatch. Always trying to minimize the costs and the decreasing of the environmental impact. This text can be seen as a case of study about hydrothermal systems using Stochastic Dual Dynamical Programming. In fact, both demand and producibility are changed, then we obtain the best combination that implies the dispatch choice with the minimum cost expectation for the system.*

**Keywords:** *Power generation, Demand, Hydrothermal Model, Planning, Dual Dynamic Stochastic Programming.*