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

ESTUDO COMPUTACIONAL SOBRE OS PONTOS CRÍTICOS DE DEMANDA ENERGÉTICA PARA MODELO HIDROTÉRMICO

Jefferson Bezerra dos Santos[1] - jeffersonsantos@ppgmmc.ci.ufpb.br
A definir[2] - e-mail
A definir[3] - e-mail
[1]Universidade Federal da Paraíba, Centro de Informática, João Pessoa, PB, Brasil
[2]
[3]

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 residênciais. Neste contexto, este trabalho tem como finalidade analisar, as consequências que o aumento da demanda associado 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).*

Palavras-chave: *Energia, Eficiência energética, Demanda, Sustentabiliade, Planejamento.*

1. INTRODUÇÃO

A crecente 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 predominante por um sistema interligado hidrotérmico, tendo como caracteríticas principais o intercâmbio de energia entre regiões e a possibilidade de complementaridade existente entre as hidréletricas e as terméletricas 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 terméletricas e das hidréletricas. Neste contexto, atualmente destaca-se a Programação Dinâmica Dual Estocática (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 afluências 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 modelamento hidrotérmico não convexo utilizando PDDE para não linearidades envolvendo reservatório de hidréletricas 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).

O presente estudo propõe a analisar os pontos críticos de demanda em modelos hidrotérmicos que utilizam a PDDE. Tendo como intuito verificar quais as consequências que variações na demanda podem ocasionar na configuração desses sistemas, além de elencar os possíveis fatores que sofreram com as mudanças ocorridas no intuito de obter um planejamento energético eficiente. Este trabalho é subvidido 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 concluões do presente estudo.

2. DESPACHO DE ENERGIA

A análise dos fatores que envolvem a matriz energética brasileira sobre os aspectos relacionados à demanda e a oferta é bastante complexa. Um dos principais elementos que ocasionam empecilho é a dependência hídrica que ocorre no setor energético brasileiro (Tolmasquim, 2016). O equilíbrio entre oferta e demanda não é apenas conseguido com um aumento de oferta, é necessária uma atuação também na demanda. Uma vez que a demanda possui uma forte relação com o desenvolvimento de um país envolvendo aspectos como o acesso que a população possui aos serviços de infra-estrutura, recebendo destaque para o saneamento básico, os transportes, as comunicações e a energia (Atlas de energia elétrica no Brasil, 2008).

De maneira geral, historicamente o setor energético convive com dois grandes extremos de uma lado a pesquisa por eficiência energética e por outro lado proporcionar que a população tenha acesso a essas inovações tecnológicas. Diante desse desafio, o Brasil possui o Sistema Interligado Nacional (SIN) que corresponde as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte. Sendo o responsável por abrigar 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 intercâmcio energético, isto é, regiões que sofrem com problemas no abastecimento de energia devido 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 a suprir demanda quando por algum motivo as hidrelétricas não possuem condições evitando-se prejuízos na oferta. O sistema de energia brasileiro também é constituido pelos sistemas isolados localizados principalmente na região Norte, estados como Amazonas, Roraima, Acre, Amapá e Rondônia. Sua 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). Portanto, o sistema brasileiro é constituído pelo SIN e pelos sistemas isolados.

A produção de eletricidade no sistema brasileiro tem como objetivo principal minizar os custo de operação e garantir o suprimento de energia em todo o país (Tolmasquim, 2016). Pelo SIN ser constituído predominantemente por um sistema hidrotérmico este é afetado pela incerteza associada a 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 o custo associado aos sistemas isolados necessita ser considerado para não ocasionar um aumento desagrável no preço associado ao sistema de energia de uma forma geral. 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.

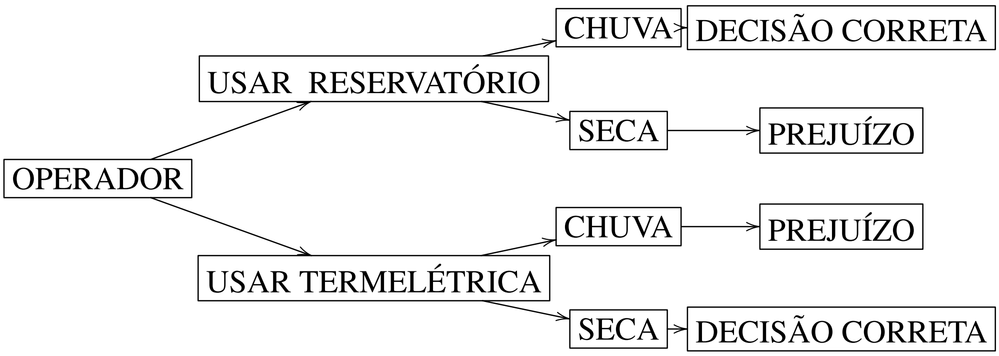


Figura 1- Dilema do operador.

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 bastante elevado. Nesta perspectiva um dos modelos de planejamento desenvolvido para lidar com a tomada de decisão de curto prazo foi desenvolvido pelo o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), o Modelo de Planejamento de Sistemas Interligados de Curto Prazo (DECOMP). 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 as características básicas são manter as metas de geração para suprir a demanda e minizar 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 deseja-se obter a combinação na qual o valor do custo associdado 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 deseja-se obter quando possível seu minimizador a função f poderá ter minimizador global (G), sendo também possível a existência de minizador local (L) para a intersecção de uma vizinhança U de pontos de f com conjunto D de restrições do problema (Izmailov & Solodov, 2014). Um entendimento intuitivo pode ser dado pela figura a seguir.

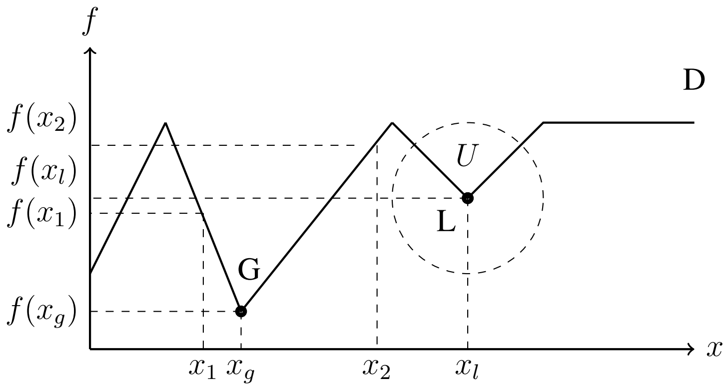


Figura 2- Minimizador global(G) e local (L),conjunto (D) sem restrições

Pela Figura (**??**) nota-se a diferença existente entre minizador global e local para f. Para todo ponto x de f que esteja no conjunto D é verdadeira a afirmação $f(x_g) \leq f(x)$, portanto G configura-se o minizador global para f, por outro lado a afirmação $f(x_l) \leq f(x)$ não é verdadeira para todo o x escolhido, sendo verdadeira apenas para um subconjunto de elementos na intersecção de uma vizinhaça U de x_l com o conjunto D de restrições. Neste caso, L é um minizador local para f. No exemplo em Figura (**??**) considerou-se todos os pontos de f sem nenhuma restrição para o conjunto. Contudo, em certas ocasiões é necessário que no processo de encontrar o minizador esse deve satisfazer determinadas restrições, por exemplo, $x > x_d$ esse tipo de caso pode ser observado na figura a seguir.

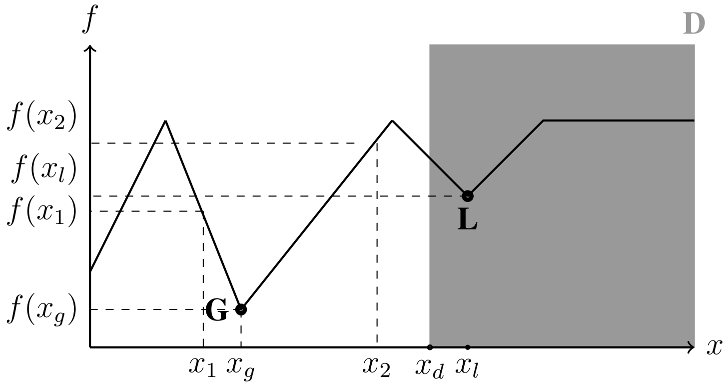


Figura 3- Mínimo global (G), e minizador global (L),(D) com restrições.

O minizador conforme figura **??** deve satisfazer a restrição $x > x_d$. Apesar do ponto G ser o mínimo de f, contudo por não pertence ao conjunto D de restrições não será o minizador. Neste caso o ponto L é o minizador global, pois $f(x_l) \leq f(x)$ para todo x de f que esteja no conjunto D. O conjunto no qual são definidas as restrições para o problema de otimização receber o nome de conjunto viável já o minimizador do problema de otimização dado o conjunto viável D esse é conhecido como ponto de ótimo sua nomenclatura comum é dada por x^*. Dadas as ideias intuitivas os conceitos formais podem ser abordados de forma a evitar qualquer tipo de ambiguidade. Desta forma, dados os conjuntos $D \subset R^n$ e $\Psi \subset R^n$ tal que $D \subset \Psi$ e existe uma função $f : \Psi \subset R$. O objetivo é encontrar o minizador para f no conjunto viável D a função f recebe o nome de função objetivo (Izmailov & Solodov, 2014). De forma equivalente pode-se representar o problema por,

$$\min f(x) \text{ sujeito a } x \in D, \tag{1}$$

onde dado o ponto $\overline{x} \in D$ este é,

- minimizador global, se
  $f(\overline{x}) \leq f(x)$ qualquer que seja $x \in D$,
- minimizador local, se
  $f(\overline{x}) \leq f(x)$ qualquer que seja $x \in D \cap U$, onde U é uma vizinhança de x.

sendo x^* o minizador procurado pertencendo ao conjunto de restrições D. Para o presente estudo é suficiente considerar o conjunto D como sendo um conjunto poliedral. De uma forma bem grosseira a ideia seria evitar possíveis "fissuras" em nosso conjunto de restrições. Um conjunto é dito poliedral quando é possível sua representação como um conjunto das soluções de um sistema finito de equações e inequações lineares (Izmailov & Solodov, 2014), por exemplo,

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

onde $A \in R(l, m)$, $B \in R(m, n)$, $a \in R^n$, e $b \in R^m$ adotando-se que $R(l, m)$ representar o espaço de matrizes com l linhas, e m colunas. Dada que f em Eq.(**??**) é uma função linear e D um conjunto poliedral na teoria da otimização problemas deste tipo são problemas de Programação Linear, por exemplo, o 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 essencial. Considerando-se um problema de Programação Linear que será chamado de problema primal,

$$\min \langle c, x \rangle \text{ sujeito a } x \in D = \{x \in R^n; Bx \geq b\}, \tag{2}$$

onde $B \in R(m, n), c \in R^n$ e $b \in R^n$ onde "<>", representar o produto interno Euclidiano. O problema dual para Eq. (**??**) é definido por,

$$\max \langle b, \mu \rangle \text{ sujeito a } \mu \in \Delta = \left\{\mu \in R^m_+; B^T\mu = c\right\}. \tag{3}$$

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 do casos o problema dual possui uma estrutura menos complexa (Izmailov & Solodov, 2014). Uma vez que o instrumentário necessário foi desenvolvido com a teoria de otimização relevante para o despacho de energia pode ser abordado 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 o acoplamento espacial existente entre as usinas hidrelétricas, ou seja, 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. Nesse contexto, foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) o DECOMP. Sua estrutura utilizar 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). Podendo ser representado por:

$$\begin{aligned} \min_{s\backslash a} c_1x_1 + c_2x_2 \\ A_1x_1 \geq b_1 \\ E_1x_1 + A_2x_2 \geq b_2 \end{aligned} \tag{4}$$

- c_1 e c_2 representam os custos relacionado ao 1 e 2 estágio respectivamente;
- x_1 e x_2 representam as decisões tomadas no 1 e 2 estágio respectivamente;
- b_1 e b_2 são os vetores de recursos no 1 e 2 estágio respectivamente;
- A_1 e A_2 representam o acoplamento espacial;
- E_1 descreve o acoplamento temporal.

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 $A_1{x_1}^* \geq b_1$, portanto o problema para decisão do 2 estágio pode ser reescrito como,

$$\begin{aligned} \min_{s\backslash a} \ c_2x_2 \\ A_2x_2 \geq b_2 - E_1{x_1}^* \end{aligned} \tag{5}$$

onde a Eq. (**??**) 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 minizar o custo da função objetivo para o 2 é 1 estágio, ou seja, minizar $c_1x_1+c_2x_2$. Dado que ${x_1}^*$ é viável procura-se uma solução ótima para x_2 representado por ${x_2}^*$ como as decisões tomadas no estágio 2 dependem das decisões tomadas no estágio 1, portanto o problema do 2 estágio pode ser visto como uma função do 1 estágio, isto é,

$$\begin{aligned} \alpha_1(x_1) = \min_{s\backslash a} \ c_2x_2 \\ A_2x_2 \geq b_2 - E_1{x_1}^* \end{aligned} \tag{6}$$

onde α_1 representar o valor ótimo para o 2 estágio a Eq.(**??**) pode ser reescrita como se segue,

$$\begin{aligned} \min_{s\backslash a} \ c_1x_1 + \alpha_1(x_1) \\ A_1x_1 \geq b_1 \end{aligned}$$

aplicando a dualidade na Eq.(**??**) é imediato que,

$$\begin{aligned} \alpha_1(x_1) = \max \ \pi(b_2 - E_1x_1) \\ \pi A_2 \leq c_2. \end{aligned} \tag{7}$$

Nas circunstâncias do problema a solução da Eq.(**??**) é equivalente a Eq.(**??**) nota-se que o conjunto viável $\pi A_2 \leq c_2$ da Eq.(**??**) não depende do valor de x_1. Desta forma, os pontos extremos ou vértices do conjunto viável podem ser caracterizados por $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_P\}$. Uma vez que a solução de um problema de Programação Linear corresponde a um vértice do conjunto viável, portanto a Eq.(**??**) pode ser reescrita como se segue,

$$\begin{aligned} \alpha_1(x_1) &= \max \ \pi^i(b_2 - E_1 x_1) \\ \pi^1 &\in \left\{\pi^1, \pi^2, \ldots, \pi^P\right\} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \alpha_1(x_1) &= \min \ \alpha \\ \alpha &\geq \pi^i(b_2 - E_1 x_1), \\ i &= 1, 2, \ldots, P \end{aligned} \tag{8}$$

onde α é uma variável escalar. Por fim a Eq.(**??**) torna-se

$$\begin{aligned} \min_{s\backslash a} \ & c_1 x_1 + \alpha \\ A_1 x_1 &\geq b_1 \\ \pi^i(b_2 - E_1 x_1) - \alpha &\leq 0 \\ i &= 1, 2, \ldots, P. \end{aligned} \tag{9}$$

A técnica para problemas determinísticos utilizada é conhecida na literatura como a decomposição de Benders (Benders, 1962) construindo um algoritmo iterativo na buscar 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 2 estágio depende dos valores que uma ou mais variáveis aleatórias podem assumir, onde 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 minizar o valor do custo esperado dado por,

$$\begin{aligned} \mathrm{z} = \min_{s\backslash a} \ & c_1 x_1 + p_1 c_2 x_{21} + p_2 c_2 x_{22} \\ A_1 x_1 &\geq b_1 \\ E_1 x_1 + A_2 x_{21} &\geq b_{21} \\ E_1 x_1 + A_2 x_{22} &\geq b_{22} \end{aligned} \tag{10}$$

este problema poder ser reescrito como,

$$\begin{aligned} z = \min_{s\backslash a} \ & c_1 x_1 + p_1 \omega_{21} + p_2 \omega_{22} \\ A_1 x_1 &\geq b_1 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \omega_{21}(x_1) &= \min_{s\backslash a} \ c_2 x_{21} \\ A_2 x_{21} &\geq b_{21} - E_1 x_1 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \omega_{22}(x_1) &= \min_{s\backslash a} \ c_2 x_{22} \\ A_2 x_{22} &\geq b_{22} - E_1 x_1 \end{aligned} \tag{13}$$

aplicando a decomposição de Benders (1962) em ω_{21} e ω_{22},

$$\begin{aligned}\omega_{21}(x_1) &= \min_{s\backslash a} \ \beta_1\\ \beta_1 &\geq \pi_1^i b_{21} - E_1 x_1\\ i &= 1, 2, \ldots, P\end{aligned}$$

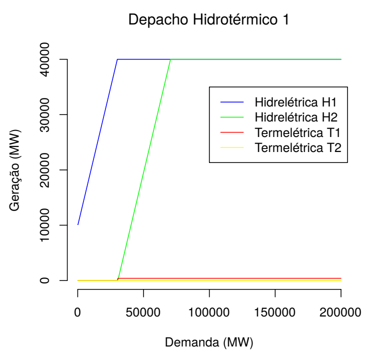
$$\begin{aligned}\omega_{22}(x_1) &= \min_{s\backslash a} \ \beta_2\\ \beta_1 &\geq \pi_2^i b_{22} - E_1 x_1\\ i &= 1, 2, \ldots, M\end{aligned}$$

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

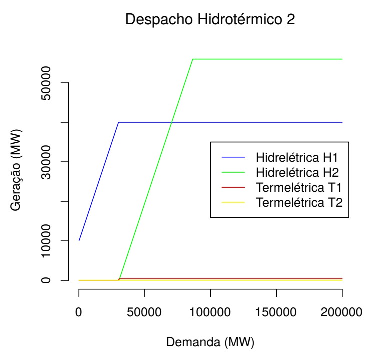
$$\begin{aligned}\min_{s\backslash a} \ c_1x_1 + p_1\beta_1 + p_2\beta_2 &\\ A_1x_1 \geq b_1&\\ \pi_1^i(b_{21} - E_1x_1) - \beta_1 \leq 0&\\ \pi_2^j(b_{22} - E_1x_1) - \beta_2 \leq 0&\\ i = 1, 2, \ldots, P&\\ j = 1, 2, \ldots, P.&\end{aligned} \tag{14}$$

A (PDDE) faz uma decomposição no problema original utilizando-se os príncipios de dualidade e a decomposição de Benders (1962). O que permite a resolução do problema original construido outro problema, contudo este último possui um melhor tratamento computacional, sendo possível analisar a influência da demanda em sistemas hidrotérmicos para vários cenários.

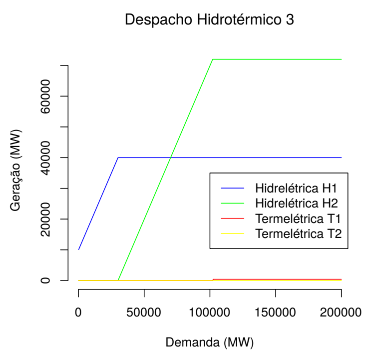
4. ANÁLISE DOS PONTOS DE DEMANDA CRÍTICOS (não foi alterado)



(a) Produtibilidade = 1,0



(b) Produtibilidade = 1,4



(c) Produtibilidade = 1,8

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

5. CONCLUSÕES

O objetivo do presente estudo foi analisar o comportamento de um sistema hidrotérmico sobre variação de demanda, como metodologia utilizou-se a Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), o sistema foi estruturado com duas hidrelétricas em cascata H1 e H2 e duas terméletricas associadas T1 e T2. Pelas simulações verificou-se que as variações na demanda podem alterar significativamente o comportamento de sistemas hidrotérmicos, mesmo com os empecilhos da utilização de terméletricas notou-se que sua utilização ainda é fundamental para o funcionamento do sistema, onde na simulação, T1 foi ativada antes que H2 para o primeiro caso, havendo também ativação da termelétrica T1 para o segundo caso de estudo. Pela independência da terméletrica T1 no sistema hidrotérmico uma vez que essa não é afetada pelo acoplamento temporal ou espacial, seu ponto de ótimo é atingido rapidamente, mesmo antes da hidrelétrica H2. O algoritmo de (PDDE) em nenhum momento da simulação solicitou a ativação de T2, isso deve-se ao fato de T1 tem atingido seu ponto de ótimo rapidamente, impossibilitando as condições de ativação de T2. Nesse contexto, a (PDDE) foi uma metodologia com resultados favoráveis, uma vez que manteve a demanda do sistema com a ativação de apenas uma termelétrica e no decorrer do processo a sua utilização permaneceu estável, evitando-se que aumentos de demanda trouxessem prejuízos de custo e ambiental. Contudo, o fato da necessidade da ativação da termétrica T1 ocorrer antes da hidrelétrica H2, pode ser considerada também uma desvatagem pelo aspecto do sistema da prioridade a sua ativação. No geral o comportamento do sistema foi esperado pela prioridade dada a utilização de H1, por outro lado pode-se observar como a independência das termelétricas afetaram o algoritmo da PDDE. O presente estudo está longe de abordar todos os aspectos que envolvem a demanda em sistemas hidrotérmicos, existindo muitas características a serem debatidas sobre o tema, por exemplo alteração de parâmetros que permitam que o algoritmo de PDDE tenha uma preferência pelas hidrelétricas, é um dos aspectos relevantes. Por fim essa análise justifica-se pela crescente preocupação ambiental e pela necessidade de suprir a demanda por energia, sendo necessária ao desenvolvimento da sociedade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANELL). *Capacidade de Geração do Brasil*. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm.Acesso em : 19 de Julho.