

PLANEJAMENTO DO DESPACHO ÓTIMO DE USINAS GERADORAS A PARTIR DO MÉTODO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA E DA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA

¹Darlan Régis Fischer

²Joelson Lopes da Paixão

³Jordan Passinato Sausen

RESUMO

O planejamento é, basicamente, uma estratégia que estabelece uma sequência de decisões a serem tomadas para alcançar um determinado objetivo, a partir da avaliação de diferentes caminhos. O objetivo do planejamento da operação energética é definir uma política de operação capaz de suprir a demanda em paralelo à minimização do custo total de operação do sistema. Desse modo, no contexto do planejamento do despacho da geração, o presente trabalho aborda um conjunto de centrais geradoras que deve atender uma determinada demanda, dentro de condições normais de operação. Esta análise tem como objetivo a determinação do despacho ótimo das unidades de geração, a partir do método de Programação Dinâmica, objetivando o menor custo de operação do sistema. Neste estudo de caso, são consideradas cinco unidades geradoras com variação de estágios de geração, até chegar à potência máxima admissível de cada unidade geradora. Através da programação dinâmica realizada dentro de um módulo específico do *software* Otimiza, é obtida a política ótima de despacho dos geradores. Adicionalmente, para avaliar os resultados obtidos a partir da modelagem realizada pelo método de programação dinâmica, o mesmo problema de estudo é abordado, modelado e solucionado utilizando o método da Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Palavras Chave: *Despacho Ótimo, Escolha de Unidades Geradoras, Programação Dinâmica, Otimização do custo.*

¹Graduado em Engenharia Elétrica. E-mail: darlan_f@hotmail.com

²Graduado em Engenharia Elétrica. E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

³Graduado em Engenharia Elétrica. E-mail: jordansausen@hotmail.com

I - INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP), engloba três grandes sistemas: a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica. O sistema de geração, é responsável pela produção de energia elétrica, formado por grandes centrais elétricas que convertem alguma fonte de energia oriunda de fontes primárias em energia elétrica. A tensão de saída dos geradores é ampliada para níveis mais elevados por meio de transformadores elevadores instalados na usina, com a finalidade de viabilizar as transmissões a longa distância, pois dessa maneira diminui-se a corrente elétrica e conseqüentemente reduz as perdas de tensão e de efeito Joule ao longo das linhas de transmissão.

O sistema de transmissão, é responsável pelo transporte de energia elétrica dos centros de geração aos de consumo, formado por linhas de transmissão e transformadores. Normalmente a tensão de transmissão varia de 230kV à 750kV.

Por fim, o sistema de distribuição realiza a distribuição da energia elétrica recebida de sistemas de transmissão aos consumidores finais.

O objetivo do planejamento da operação energética é definir uma política de operação capaz de suprir a demanda em paralelo a minimização do custo de operação do sistema. A definição do preço da energia no Brasil é baseada no custo marginal de operação, que reflete o acréscimo no custo de operação do sistema devido ao aumento marginal da demanda [4].

Sendo assim, no modelo de despacho de geração nacional, existe um operador independente do sistema que busca a minimização deste custo. Desse modo, no contexto do planejamento do despacho de geração, o presente trabalho estuda um conjunto de centrais geradoras, que deve atender uma determinada demanda dentro de condições normais de operação. Portanto, se torna necessário estabelecer quanto cada central geradora irá despachar sob uma análise técnico-financeira.

Esta análise tem como objetivo a determinação do despacho ótimo das unidades de geração, a partir do método de Programação Dinâmica. Este método é bastante utilizado na solução de problemas que requerem decisões sequenciais inter-relacionadas, ou seja, onde o tempo ou a sequência de decisões é relevante [2]. Portanto, é estabelecida uma política ótima de planejamento do despacho de geração, caracterizando uma evolução ao longo do tempo em paralelo com a otimização do custo de despacho de cada gerador.

O restante do artigo está estruturado como segue: a Seção II apresenta o conceito de programação dinâmico no contexto do planejamento do despacho ótimo de geradores. Posteriormente, a Seção III aborda o estudo de caso de otimização do despacho de energia elétrica de uma rede de distribuição. A

Seção IV aborda a ferramenta de Programação Dinâmica presente no *software Otimiza*, bem como a modelagem e resolução do mesmo problema pela Programação Linear Inteira Mista. Por fim, na Seção V são apresentadas as conclusões.

II – PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

O planejamento é, basicamente, uma estratégia que estabelece uma sequência de decisões para alcançar um determinado objetivo, a partir da avaliação de diferentes caminhos. A técnica de programação dinâmica, ou otimização recursiva, é um procedimento de otimização que resolve problemas de decisão multiestágio, ou seja, um processo que pode ser fragmentado em um número de etapas sequenciais. Cada estágio possui uma condição, conhecida como estado, que a partir da sua transição exerce influência nas decisões tomadas.

A sequência de decisões caracteriza a estratégia, ou política de planejamento, que almeja um determinado retorno. Este retorno, estabelece um benefício associado a cada estágio de decisão. No presente trabalho, este retorno é caracterizado pelo despacho ótimo de unidades geradoras para o suprimento de uma determinada demanda de energia elétrica.

Em relação a modelagem da programação dinâmica, esta é caracterizada por um processo sequencial, baseado no processo Markoviano. De acordo com [3], “*Um processo é Markoviano quando o futuro depende apenas da situação presente, ou seja, o passado não tem nenhuma influência nas decisões futuras*”. Em outras palavras, para estabelecer a política ótima de despacho em cada estágio, é necessário conhecer apenas o nível de geração de energia no início do período analisado. Esta característica torna o processo Markoviano indispensável para que o Princípio da Otimalidade de Bellman seja aplicado [3]. Este princípio estabelece que “*Para um dado estado do sistema, a política ótima para os estados remanescentes é independente da política adotada em estados anteriores*” [1].

Baseada neste princípio, a programação dinâmica é capaz de transformar um problema de decisão sequencial contendo diversas variáveis interdependentes em uma série de subproblemas contendo poucas variáveis. A grande vantagem deste método é o ganho computacional quando comparado a outras técnicas de otimização, pois, o esforço computacional cresce de forma exponencial com número de variáveis [3]. Entretanto, este crescimento é linear com relação ao número de subproblemas.

Em outras palavras, na programação dinâmica o problema é decomposto em etapas de decisão, gerando subproblemas do problema geral que tornam a análise computacional mais eficiente. Dependendo da complexidade do problema, deve-se decompô-lo em mais etapas ou subproblemas. Por

exemplo, um determinado problema pode ser aberto em cinco etapas para resolução, tais como t_1 , t_2 , t_3 , t_4 e t_5 que estão ilustradas conforme Figura 1.

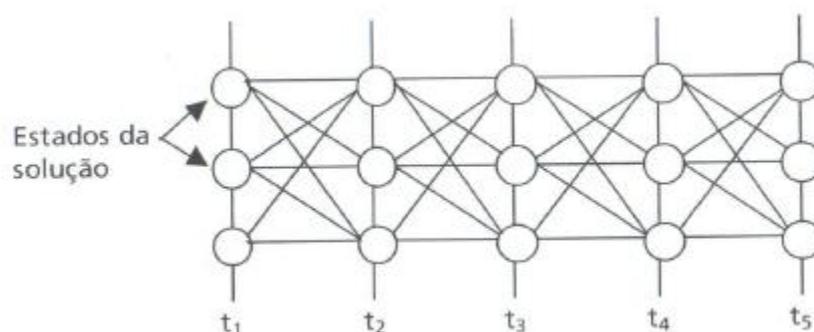


Figura 1: Componentes da programação dinâmica. [1]

A partir destes subproblemas são formadas diferentes etapas com suas respectivas soluções possíveis e assim, sucessivamente, de forma recursiva chega-se a solução geral do problema. Como o problema matemático da programação dinâmica não possui uma forma definida, é utilizada uma técnica de resolução recursiva, que por sua vez, se assemelha com um algoritmo recursivo [1]. Desse modo, cada etapa do problema é resolvida a partir da solução de etapas menores, ou então, de subproblemas provenientes do problema original.

A característica que difere a programação dinâmica do algoritmo recursivo é a tabela que armazena as soluções dos subproblemas na programação dinâmica. Esta tabela torna a programação dinâmica mais eficiente que o algoritmo recursivo, que por sua vez, estabelece uma recorrência da solução de cada subproblema que torna sua solução lenta e ineficiente. Portanto, o problema geral da programação dinâmica possui uma estrutura onde a solução de qualquer etapa deve conter soluções dos subproblemas antecedentes [2].

Matematicamente, a forma geral recursiva do problema de programação dinâmica, de acordo com o princípio da otimalidade apresentado, para um problema de minimização, pode ser dada por:

$$f_i(P_i) = \min_{P_{i+1} \in \Omega_{i+1}} [d_{P_i P_{i+1}} + f_{i+1}(P_{i+1})], i \in \Omega_i \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

P_i : é um estado possível na etapa i

P_{i+1} : é um estado possível na etapa $i+1$

Ω_i, Ω_{i+1} : conjunto de estados possíveis nas etapas i e $i+1$, respectivamente.

Na Equação 1, tem-se o método de programação dinâmica, de forma recursiva, utilizada a partir da etapa final em direção à etapa inicial, quando se obtém a trajetória ótima. Esse método, em algumas aplicações, pode ser realizado, também de forma recursiva, porém da etapa inicial para a etapa final [5].

Com o objetivo de aplicar a programação dinâmica para a solução do despacho ótimo de unidades geradoras, será abordado a seguir um estudo de caso.

III – ESTUDO DE CASO

No Brasil, o despacho é dado de modo que as usinas que apresentam um custo de geração mais barato sejam as primeiras a serem despachadas. Deste modo, para atender uma determinada demanda, as usinas elétricas que apresentam um custo menor por MWh menor são despachadas e, a partir destas, as demais usinas presentes no sistema interligado nacional (SIN), vão sendo despachadas por ordem de menor preço, até completar a pilha de usinas necessárias para atender a demanda total de energia solicitada.

De modo geral, as usinas que apresentam um menor custo unitário de produção são as hidrelétricas de grande porte. As usinas termelétricas, também presentes no sistema interligado, apresentam um custo maior, sendo utilizadas comumente em períodos de baixa geração hídrica ou em períodos que apresentam pouca afluência de chuvas. Tais usinas também são utilizadas em horários de alta demanda ou horários de pico de consumo, para suprir a potência demandada; evitando cortes de cargas.

Para elucidar o problema de despacho de usinas, este artigo traz um estudo de caso, o qual aborda uma rede de distribuição de energia elétrica. O problema principal consiste na determinação do despacho ótimo de unidades de geração deve atender um montante de carga, de determinada região, a qual pode ser concentrada e representada de modo equivalente por uma única carga de 740 MVA. Para alimentar esta carga equivalente, dispõem-se de cinco usinas geradoras, as quais são chamadas aqui de: Geradora1, Geradora2, Geradora3, Geradora4 e Geradora5, como ilustrada na Figura 2. Estas usinas geradoras, apresentam uma capacidade máxima de despacho de 270 MVA, 330 MVA, 330 MVA, 280 MVA e 265 MVA, respectivamente.

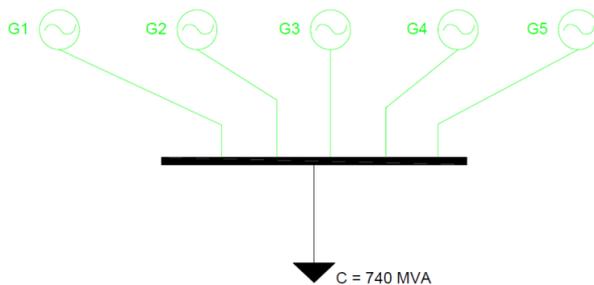


Figura 2: Equivalente da rede de distribuição de energia elétrica.

Cada usina tem uma capacidade máxima de geração, onde o custo desta geração é estabelecido por estágios (ou *taps*), conforme é apresentado na Tabela 1. A solução deste problema é caracterizada pela definição da quantidade de potência que deve ser despachada por cada uma das usinas geradoras, e pela determinação de qual será o custo mínimo por MWh, para que se atenda a carga total demandada.

Tabela 1: Custos de unidades de geração.

Unidades Geradoras	TAPs (MVA)	Custo (\$/MVA)
G1	30	400
	70	700
	110	980
	150	1130
	190	1290
	230	1300
	270	1400
G2	60	750
	105	950
	150	1220
	195	1440
	240	1610
	285	1730
G3	330	1805
	50	500
	120	900
	190	1250
	260	1500
G4	330	1680
	30	500
	80	740
	130	935
	180	1100
	230	1250
G5	280	1600
	90	930
	115	1000
	140	1080
	165	1130
	190	1205
	215	1300
	240	1385
265	1470	

Cada etapa de decisão corresponde ao comissionamento de um gerador, ou seja, é realizada a avaliação do seu despacho. Portanto, no presente estudo, o número de etapas de decisão corresponde ao número de unidades de geração avaliadas. Assim, o custo operacional ótimo é representado através da Equação 2.

$$\min f_i = f_{i-1}(D - P) + F(P_i), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Onde, f_i é o custo acumulado do gerador i , f_{i-1} é o custo acumulado do gerador $i-1$, $F(P_i)$ é o custo da unidade de geração i e n é o número de unidades de geração [1].

A partir dos dados correspondentes as funções de custo para cada unidade geradora e a demanda total a ser atendida, será formulada a combinação de comissionamento entre os geradores disponíveis através de um método recursivo, partindo da etapa final para a inicial. [6]

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de custo dado em (\$/MVA) em função dos taps dados em (MVA) de cada umas das cinco unidades de geração disponíveis para atender o montante de carga equivalente de 740 MVA.

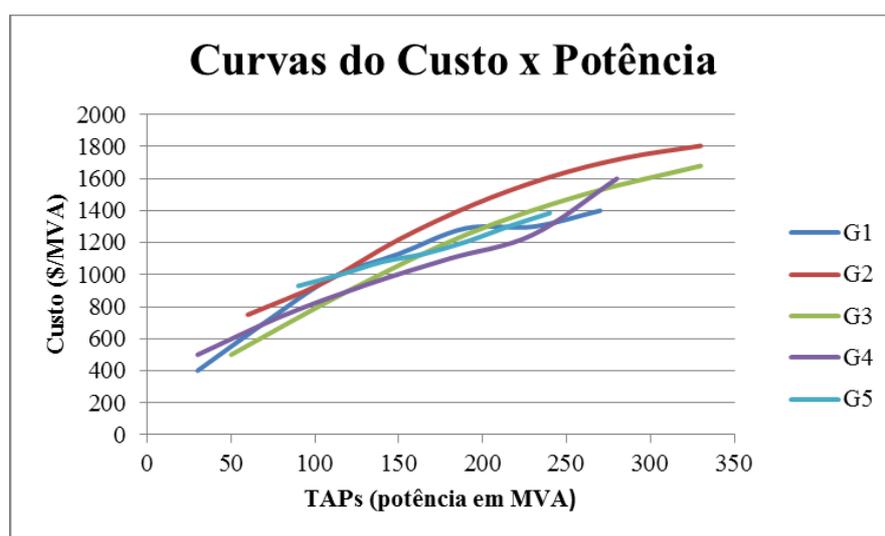


Figura 3: Curvas do custo de geração em função da potência, por unidade geradora.

A otimização busca definir quais os despachos devem ser realizados de modo a atender a carga total presente na barra, respeitando a capacidade de despacho de cada unidade em paralelo ao menor custo possível. O *software* Otimiza possui uma aplicação onde é possível determinar o melhor estágio

utilizado por cada gerador, a fim de minimizar os custos totais de geração no sistema, como será exposto a seguir.

IV – POLÍTICA ÓTIMA DE DESPACHO DA GERAÇÃO.

A política de despacho ótimo se caracteriza por ser a alternativa que garante o melhor resultado técnico-econômico. Isto é, do ponto técnico, determina qual a contribuição de cada unidade geradora para produzir a energia demandada pelas cargas; enquanto que, do ponto de vista econômico, visa garantir que o atendimento se dê ao mínimo custo de geração possível. A seguir, o problema de despacho apresentado na Seção III será resolvido pela PD e pela PLIM.

A) RESOLUÇÃO POR MEIO DA PD

A ferramenta de Programação Dinâmica permite estabelecer a melhor condição de operação de um sistema elétrico em conformidade com um determinado objetivo. Neste caso, o objetivo é encontrar o despacho ótimo de cada unidade geradora, atendendo a carga demanda e o critério do mínimo custo possível. Na Figura 4 é mostrado um esboço com todas as trajetórias possíveis para realização do despacho.

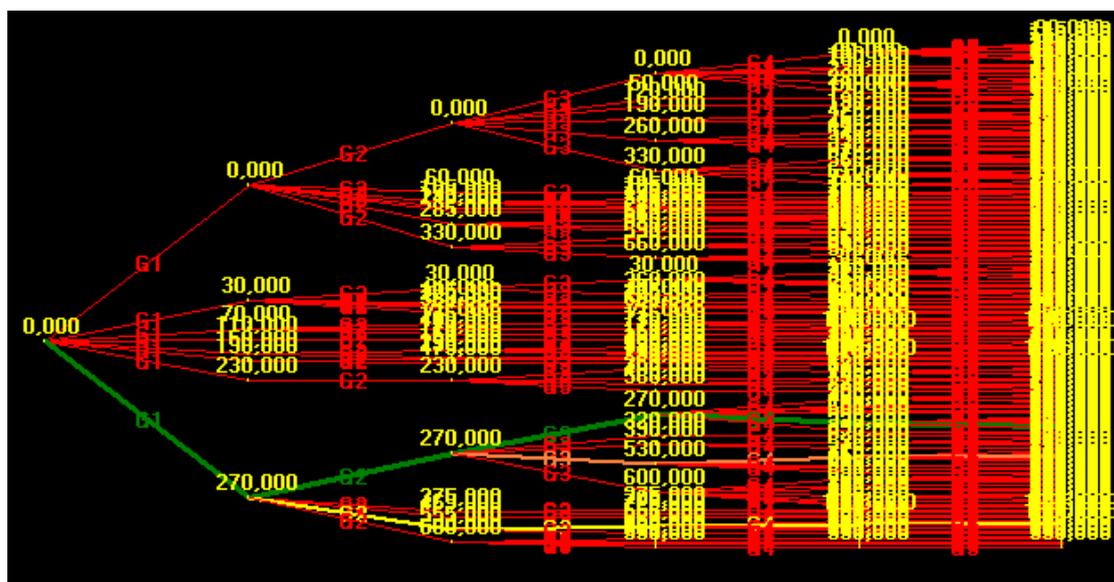


Figura 4: Árvore de busca da trajetória ótima de despacho.

Esta árvore de busca apresenta as etapas de decisão para determinar o despacho dos geradores, além de uma parte dos estados possíveis da solução em cada etapa, com exceção dos estados que foram

descartados. Portanto, para cada ligação são apresentados a etapa de decisão, os níveis de tensão e os custos de transição para o estado da demanda atendida na etapa seguinte [1]. Estes custos são representados por nós na Figura 5, onde são destacados o valor da demanda para o estado da solução e o custo acumulado para a próxima etapa.

Desse modo, a última etapa resulta nas políticas ótimas de cada um dos estados possíveis. O resultado final é obtido a partir da trajetória destacada na cor verde, que garante a política ótima de despacho, traçada pelo Otimiza.

A combinação ótima de comissionamento entre os geradores candidatos é apresentada através de um relatório, no qual é mostrada a política ótima de despacho através da Figura 5. Entretanto, esta combinação nem sempre atinge a demanda com exatidão. Portanto, o relatório também apresenta a melhor política de despacho para os casos em que a demanda é ligeiramente menor e maior que a demanda a ser atendida.

Política Ótima de Despacho da Geração		
Gerador	Despacho (MVA)	Custo (\$)
G1	270,0	1400,00
G2	0,0	0,00
G3	0,0	0,00
G4	230,0	1250,00
G5	240,0	1385,00

Total	740,0	4035,00

Melhor Política de Despacho da Geração em que o despacho é MENOR que a demanda		
Gerador	Despacho (MVA)	Custo (\$)
G1	270,0	1400,00
G2	285,0	1730,00
G3	0,0	0,00
G4	180,0	1100,00
G5	0,0	0,00

Total	735,0	4230,00

Melhor Política de Despacho da Geração em que o despacho é MAIOR que a demanda		
Gerador	Despacho (MVA)	Custo (\$)
G1	270,0	1400,00
G2	0,0	0,00
G3	260,0	1500,00
G4	0,0	0,00
G5	215,0	1300,00

Total	745,0	4200,00

Figura 5: Relatórios de saída do programa Otimiza.

Por meio da programação dinâmica, verificou-se que é possível escolher estágios de despacho para as unidades geradoras, de modo a atender a carga demandada ao menor custo. Assim, para suprir a demanda de 740 MVA, a política ótima de despacho consiste em despachar as unidades geradoras G1 em 270 MVA, G4 em 230 MVA, G5 em 240 MVA e ainda, verificou-se que as unidades G2 e G3 não devem ser despachadas. A totalidade dos despachos implicam em um custo total de, aproximadamente, \$ 4035,00.

Ainda, em comparação com os resultados obtidos na programação dinâmica, o problema também é resolvido por meio da PLIM.

B) MODELAGEM E RESOLUÇÃO POR MEIO DA PLIM

Antes de apresentar a formulação do algoritmo da PLIM, para resolução do despacho ótimo, é interessante explicar como é feita a modelagem deste problema. A formulação generalizada da PLIM, para o caso de n geradores com m segmentos cada, pode ser dada por [1]:

$$\min \sum_{j=0}^{n-1} \left[C_{j,0} \delta_{j,0} + \sum_{i=0}^{m-1} (C'_{j,i} X_{j,i}) \right]$$

s. a.

$$\delta_{j,i} \geq \delta_{j,i+1} \quad j = 0, \dots, n-1; \quad i = 0, \dots, m-2$$

$$X_{j,i} \leq M_{j,i} \delta_{j,i} \quad j = 0, \dots, n-1; \quad i = 0, \dots, m-1$$

$$X_{j,i} \geq M_{j,i} \delta_{j,i+1} \quad j = 0, \dots, n-1; \quad i = 0, \dots, m-2$$

$$X_j = a_j \delta_{j,0} + \sum_{i=0}^{m-1} X_{j,i} \quad j = 0, \dots, n-1$$

$$\sum_{j=0}^{n-1} X_j \geq D$$

onde:

n : número total de geradores;

m : número de segmentos (ou *taps*) do gerador;

$C_{j,0}$: custo inicial fixo do gerador j , em \$;

$C_{j,i}$: custo unitário do gerador j para o *tapi*, em \$/MVA;

$X_{j,i}$: potência fornecida pelo gerador j no *tapi*, em MVA;

X_j : potência fornecida pelo gerador j , em MVA;

$\delta_{j,0}$: variável de decisão referente ao gerador j (1: despacha, 0: não despacha);

$\delta_{j,i}$: variável de decisão referente ao gerador j no *tapi* (1: despacha, 0: não despacha);

$M_{j,i}$: capacidade máxima do gerador j no *tapi*, em MVA;

a_j : despacho mínimo do gerador j , em MVA.

Todas as variáveis δ são binárias e precisam ser declaradas no *software* Otimiza como sendo do tipo INT.

Para dinamizar a leitura, o algoritmo de programação PLIM e sua resolução são apresentados nos Apêndices 1 e 2. Sendo que no Apêndice 1 é apresentado código de programação e no Apêndice 2 é exposta a solução obtida através da PLIM para validar os resultados anteriores, ambos estudos desenvolvidos dentro do *software* Otimiza.

V – CONCLUSÕES

Adentrando ao contexto do planejamento do despacho de geração, explanando as variáveis que devem ser consideradas, e como este problema é tratado; o presente trabalho desenvolveu-se com base em uma rede de distribuição de energia elétrica. Esta possui um conjunto de centrais geradoras que devem ser despachada a fim de atender uma determinada demanda; respeitando as condições normais de operação de cada usina.

Portanto, desejou-se estabelecer o quanto de energia cada central geradora deveria despachar, sob uma análise técnico-financeira, que objetivava determinar o despacho ótimo das unidades de geração ao menor custo possível. Este objetivo foi alcançado por meio do método de programação dinâmica, o qual permitiu resolver problemas mais complexas, por meio de um conjunto de decisões tomadas nos estágios em que o problema foi reescrito.

Sendo assim, o processo completo foi fragmentado em um número de etapas sequenciais, onde cada uma possuía um estado que, a partir da sua transição, exercia influência nas decisões tomadas. A sequência de decisões tomadas caracterizou a política de planejamento, que resultou em um benefício associado a cada estágio. Na resolução deste estudo de caso, encontrou-se que o despacho ótimo das unidades geradoras se dá com um custo mínimo de \$ 4035,00; aproximadamente.

O resultado obtido por meio da programação dinâmica, foi validado a partir da modelagem do problema utilizando a Programação Linear Interia Mista (PLIM), conforme será mostrado a seguir nos Apêndices 1 e 2.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Kagan; H. P. Schmidt; C. C. B. Oliveira e H. Kagan. Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência, São Paulo: Editora Blucher, 2009. ISBN 978-85-212-0472-5.

- [2] F. Gomide. Introdução à Programação Dinâmica, São Paulo: UNICAMP. Disponível em: <http://www.dca.fee.unicamp.br/~gomide/courses/IA718/transp/IA718IntroducaoProgramacaoDinamica_2.pdf>.
- [3] R. E. Campello. Programação Dinâmica Determinística e Estocástica. XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro, Novembro de 2002. Disponível em: <http://www.pucrs.br/famat/viali/graduacao/producao/po_2/literatura/pdinamica/monografias/arq0225.pdf>.
- [4] L. G. B. Marzano. Otimização de Portfólio de Contratos de Energia em Sistemas Hidrotérmicos com Despacho Centralizado. Tese de Doutorado. Pontífca Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- [5] R. Bellman. *Dynamicprogramming*, Princeton, N, J., 1957.
- [6] B. F. Wollenberg, A. Wood. *Power generationoperationandcontrol*, 2ª Edition, John Wileyand Sons, 1996.

APÊNDICE 1

Formulação do algoritmo para resolução por PLIM:

$$\begin{aligned} \text{MIN} \quad & 400d_{0_0} + 7.5x_{0_0} + 7x_{0_1} + 3.75x_{0_2} + 4x_{0_3} + 0.25x_{0_4} + 2.5x_{0_5} + 750d_{1_0} + \\ & 4.4444x_{1_0} + 6x_{1_1} + 4.8889x_{1_2} + 3.7778x_{1_3} + 2.6667x_{1_4} + 1.6667x_{1_5} + 500d_{2_0} + \\ & 5.7143x_{2_0} + 5x_{2_1} + 3.5714x_{2_2} + 2.5714x_{2_3} + 500d_{3_0} + 4.8x_{3_0} + 3.9x_{3_1} + 3.3x_{3_2} + 3x_{3_3} \\ & + 7x_{3_4} + 930d_{4_0} + 2.8x_{4_0} + 3.2x_{4_1} + 2x_{4_2} + 3x_{4_3} + 3.8x_{4_4} + 3.4x_{4_5} + 3.4x_{4_6} \end{aligned}$$

SUBJECT TO

!condições do G1

$$\begin{aligned} 1.00d_{0_0} - 1.00d_{0_1} & \geq 0.000000 \\ 1.00d_{0_1} - 1.00d_{0_2} & \geq 0.000000 \\ 1.00d_{0_2} - 1.00d_{0_3} & \geq 0.000000 \\ 1.00d_{0_3} - 1.00d_{0_4} & \geq 0.000000 \\ 1.00d_{0_4} - 1.00d_{0_5} & \geq 0.000000 \\ -40.00d_{0_0} + 1.00x_{0_0} & \leq 0.000001 \\ -40.00d_{0_1} + 1.00x_{0_0} & \geq -0.000001 \\ -40.00d_{0_1} + 1.00x_{0_1} & \leq 0.000001 \end{aligned}$$

$$-40,00d0_2 + 1,00x0_1 \geq -0.000001$$

$$-40,00d0_2 + 1,00x0_2 \leq 0.000001$$

$$-40,00d0_3 + 1,00x0_2 \geq -0.000001$$

$$-40,00d0_3 + 1,00x0_3 \leq 0.000001$$

$$-40,00d0_4 + 1,00x0_3 \geq -0.000001$$

$$-40,00d0_4 + 1,00x0_4 \leq 0.000001$$

$$-40,00d0_5 + 1,00x0_4 \geq -0.000001$$

$$-40,00d0_5 + 1,00x0_5 \leq 0.000000$$

$$-30,00d0_0 -1,00x0_0 -1,00x0_1 -1,00x0_2 -1,00x0_3 -1,00x0_4 -1,00x0_5 + 1,00x0 = 0.000000$$

!condições do G2

$$1,00d1_0 -1,00d1_1 \geq 0.000000$$

$$1,00d1_1 -1,00d1_2 \geq 0.000000$$

$$1,00d1_2 -1,00d1_3 \geq 0.000000$$

$$1,00d1_3 -1,00d1_4 \geq 0.000000$$

$$-45,00d1_0 + 1,00x1_0 \leq 0.000001$$

$$-45,00d1_1 + 1,00x1_0 \geq -0.000001$$

$$-45,00d1_1 + 1,00x1_1 \leq 0.000001$$

$$-45,00d1_2 + 1,00x1_1 \geq -0.000001$$

$$-45,00d1_2 + 1,00x1_2 \leq 0.000001$$

$$-45,00d1_3 + 1,00x1_2 \geq -0.000001$$

$$-45,00d1_3 + 1,00x1_3 \leq 0.000000$$

$$-45,00d1_4 + 1,00x1_3 \geq -0.000001$$

$$-45,00d1_4 + 1,00x1_4 \leq 0.000000$$

$$-60,00d1_0 -1,00x1_0 -1,00x1_1 -1,00x1_2 -1,00x1_3 -1,00x1_4 + 1,00x1 = 0.000000$$

!condições do G3

$$1,00d2_0 -1,00d2_1 \geq 0.000000$$

$$1,00d2_1 -1,00d2_2 \geq 0.000000$$

$$1,00d2_2 -1,00d2_3 \geq 0.000000$$

$$-70,00d2_0 + 1,00x2_0 \leq 0.000001$$

$$-70,00d2_1 + 1,00x2_0 \geq -0.000001$$

$$-70,00d2_1 + 1,00x2_1 \leq 0.000001$$

$$\begin{aligned}
 -70,00d2_2 + 1,00x2_1 &\geq -0.000001 \\
 -70,00d2_2 + 1,00x2_2 &\leq 0.000001 \\
 -70,00d2_3 + 1,00x2_2 &\geq -0.000001 \\
 -70,00d2_3 + 1,00x2_3 &\leq 0.000001 \\
 -50,00d2_0 -1,00x2_0 -1,00x2_1 -1,00x2_2 -1,00x2_3 + 1,00x2 &= 0.000000
 \end{aligned}$$

!condições do G4

$$\begin{aligned}
 1,00d3_0 -1,00d3_1 &\geq 0.000000 \\
 1,00d3_1 -1,00d3_2 &\geq 0.000000 \\
 1,00d3_2 -1,00d3_3 &\geq 0.000000 \\
 1,00d3_3 -1,00d3_4 &\geq 0.000000 \\
 -50,00d3_0 + 1,00x3_0 &\leq 0.000001 \\
 -50,00d3_1 + 1,00x3_0 &\geq -0.000001 \\
 -50,00d3_1 + 1,00x3_1 &\leq 0.000001 \\
 -50,00d3_2 + 1,00x3_1 &\geq -0.000001 \\
 -50,00d3_2 + 1,00x3_2 &\leq 0.000001 \\
 -50,00d3_3 + 1,00x3_2 &\geq -0.000001 \\
 -50,00d3_3 + 1,00x3_3 &\leq 0.000001 \\
 -50,00d3_4 + 1,00x3_3 &\geq -0.000001 \\
 -50,00d3_4 + 1,00x3_4 &\leq 0.000000 \\
 -30,00d3_0 -1,00x3_0 -1,00x3_1 -1,00x3_2 -1,00x3_3 -1,00x3_4 + 1,00x3 &= 0.000000
 \end{aligned}$$

!condições do G5

$$\begin{aligned}
 1,00d4_0 -1,00d4_1 &\geq 0.000000 \\
 1,00d4_1 -1,00d4_2 &\geq 0.000000 \\
 1,00d4_2 -1,00d4_3 &\geq 0.000000 \\
 1,00d4_3 -1,00d4_4 &\geq 0.000000 \\
 1,00d4_4 -1,00d4_5 &\geq 0.000000 \\
 1,00d4_5 -1,00d4_6 &\geq 0.000000 \\
 -25,00d4_0 + 1,00x4_0 &\leq 0.000001 \\
 -25,00d4_1 + 1,00x4_0 &\geq -0.000001 \\
 -25,00d4_1 + 1,00x4_1 &\leq 0.000001 \\
 -25,00d4_2 + 1,00x4_1 &\geq -0.000001 \\
 -25,00d4_2 + 1,00x4_2 &\leq 0.000001
 \end{aligned}$$

```

-25,00d4_3 + 1,00x4_2 >= -0.000001
-25,00d4_3 + 1,00x4_3 <= 0.000001
-25,00d4_4 + 1,00x4_3 >= -0.000001
-25,00d4_4 + 1,00x4_4 <= 0.000001
-25,00d4_5 + 1,00x4_4 >= -0.000001
-25,00d4_5 + 1,00x4_5 <= 0.000000
-25,00d4_6 + 1,00x4_5 >= -0.000001
-25,00d4_6 + 1,00x4_6 <= 0.000000
-90,00d4_0 -1,00x4_0 -1,00x4_1 -1,00x4_2 -1,00x4_3 -1,00x4_4 -1,00x4_5 -1,00x4_6 +
1,00x4 = 0.000000

```

!condição final para atender toda a potência

```
1,00x0 + 1,00x1 + 1,00x2 + 1,00x3 + 1,00x4 >= 740,00
```

END

INT d0_0

INT d0_1

INT d0_2

INT d0_3

INT d0_4

INT d0_5

INT d1_0

INT d1_1

INT d1_2

INT d1_3

INT d1_4

INT d2_0

INT d2_1

INT d2_2

INT d2_3

INT d3_0

INT d3_1

INT d3_2

INT d3_3

INT d3_4

INT d4_0

INT d4_1

INT d4_2

INT d4_3

INT d4_4

INT d4_5

INT d4_6

! x0: despacho total do gerador G1

! x1: despacho total do gerador G2

! x2: despacho total do gerador G3

! x3: despacho total do gerador G4

! x4: despacho total do gerador G5

APÊNDICE 2

Solução ótima encontrada:

$Z = 4035,0000$

$d0_0 = 1,0000$

$x0_0 = 40,0000$

$x0_1 = 40,0000$

$x0_2 = 40,0000$

$x0_3 = 40,0000$

$x0_4 = 40,0000$

$x0_5 = 40,0000$

d1_0 = 0,0000
x1_0 = 0,0000
x1_1 = 0,0000
x1_2 = 0,0000
x1_3 = 0,0000
x1_4 = 0,0000
x1_5 = 0,0000
d2_0 = 0,0000
x2_0 = 0,0000
x2_1 = 0,0000
x2_2 = 0,0000
x2_3 = 0,0000
d3_0 = 1,0000
x3_0 = 50,0000
x3_1 = 50,0000
x3_2 = 50,0000
x3_3 = 50,0000
x3_4 = 0,0000
d4_0 = 1,0000
x4_0 = 25,0000
x4_1 = 25,0000
x4_2 = 25,0000
x4_3 = 25,0000
x4_4 = 25,0000
x4_5 = 25,0000
x4_6 = 0,0000
d0_1 = 1,0000
d0_2 = 1,0000
d0_3 = 1,0000
d0_4 = 1,0000
d0_5 = 1,0000
x0 = 270,0000

$$d1_1 = 0,0000$$

$$d1_2 = 0,0000$$

$$d1_3 = 0,0000$$

$$d1_4 = 0,0000$$

$$x1 = 0,0000$$

$$d2_1 = 0,0000$$

$$d2_2 = 0,0000$$

$$d2_3 = 0,0000$$

$$x2 = 0,0000$$

$$d3_1 = 1,0000$$

$$d3_2 = 1,0000$$

$$d3_3 = 1,0000$$

$$d3_4 = 0,0000$$

$$x3 = 230,0000$$

$$d4_1 = 1,0000$$

$$d4_2 = 1,0000$$

$$d4_3 = 1,0000$$

$$d4_4 = 1,0000$$

$$d4_5 = 1,0000$$

$$d4_6 = 0,0000$$

$$x4 = 240,0000$$