

## Despacho de geração com aplicação do método programação dinâmica

Diomar A.C. Lima<sup>a,\*</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7464-4579>, ([diomar.lima@acad.ufsm.br](mailto:diomar.lima@acad.ufsm.br))

Francisco G. Fabrin<sup>a</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0407-9786>, ([francisco.fabrin@acad.ufsm.br](mailto:francisco.fabrin@acad.ufsm.br))

Daniel P. Bernardon<sup>a</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7952-1049>, ([dpbernardon@ufsm.br](mailto:dpbernardon@ufsm.br))

Mario O. Oliveira<sup>b</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7416-1857>, ([mario.oliveira@fio.unam.edu.ar](mailto:mario.oliveira@fio.unam.edu.ar))

Roberto J. Cabral<sup>b</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-2571-8695>, ([robert\\_rjc@hotmail.com](mailto:robert_rjc@hotmail.com))

<sup>a</sup> Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência, Santa Maria, Brasil.

<sup>b</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

---

### Resumo

Um dos grandes desafios das empresas distribuidoras de energia é manter o atendimento da demanda solicitadas por seus clientes. Desta forma o Operador Nacional do Sistema necessita realizar estudos complexos para atender a demanda de todo o sistema elétrico brasileiro. Desta forma se faz necessário o uso de ferramentas computacionais para auxiliar na tomada de decisão sobre o despacho de geração. Neste trabalho será utilizado o Método de Programação Dinâmica Determinística para ilustrar o comportamento das centrais geradoras frente a uma demanda (carga) solicitada pela rede.

**Palavras Chave** – Despacho, Geração, Otimização, Programação Dinâmica, Planejamento.

---

### Abstract

One of the great challenges that electricity distribution companies face is to constantly meet the demand of their customers. Thus, the National Electric System Operator (ONS) must carry out complex studies in order to satisfy the demand of the entire Brazilian electrical system, which requires the use of computational tools to assist in the decision making when it comes to the generation dispatch. In this work, the Deterministic Dynamic Programming (DDP) method is used to illustrate the behavior of generating plants in response to a certain demand (load) generated by the electrical network.

**Keywords** – Energy dispatch, Generation, Optimization, Dynamic Programming, Planning.

---

## 1. Introdução

Atualmente as empresas fornecedoras de energia elétrica possuem um grande desafio de manter seus sistemas de distribuição fornecendo energia a todos seus clientes, mantendo a continuidade do fornecimento e a qualidade da energia, o que leva ao atendimento dos indicadores de qualidade especificados pela ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica [1]. Devido aos constantes aumentos de carga, surge um grande desafio que é manter o sistema elétrico operando de forma adequada para atender a todos os consumidores com qualidade. O sistema elétrico brasileiro possui um grande número de usinas geradoras de energia para atender a demanda, no entanto encontram-se distribuídas em todo o território brasileiro. Para isso, o Operador Nacional do Sistema (ONS) [2],

deve ter um planejamento de despacho rigoroso e realizado de forma eficaz para atender a demanda solicitada.

De acordo com Siqueira [3], o Planejamento da Operação Energética (POE) tem como objetivo determinar metas de geração para cada usina do sistema elétrico a cada estágio (mês) do período de planejamento (anos) que minimizam o custo total de operação, atendendo a demanda e respeitando as restrições operativas das usinas.

A Programação Dinâmica (PD) é a ferramenta mais utilizada na resolução do POE devido, entre outras coisas, à sua capacidade de representar a natureza estocástica das vazões afluentes futuras.

O POE de sistemas hidrotérmicos interligados é um problema de grande porte que tem o objetivo de buscar estratégias operativas que minimizam o custo total da operação sem comprometer o nível de garantia de atendimento ao longo de um determinado horizonte de planejamento. O custo total que se pretende minimizar compreende a soma dos custos variáveis de todos os recursos utilizados, caso a demanda não seja suprida, acrescidos do custo associado a um possível racionamento de energia elétrica.

## 2. Descrição do problema

O fornecimento de energia elétrica com qualidade é de suma importância para as concessionárias de energia, isto devido a cobranças dos órgãos reguladores e principalmente pelos consumidores. A qualidade da energia fornecida a estes clientes pode ser avaliada através dos seguintes itens [1]:

- Continuidade do fornecimento;
- Nível de tensão;
- Oscilações rápidas de tensão;
- Desequilíbrio de tensão;
- Distorções harmônicas da tensão.

Um dos pilares relacionados a qualidade é a disponibilidade desta energia. O fato do território brasileiro ser extenso e conseqüentemente, as geradoras hidroelétricas encontrarem-se em locais distantes dos centros de consumo, aliado a isso existirem diversos tipos de fontes geradoras, torna-se crucial ao ONS possuir programas informatizados e pessoas qualificadas para realizar o melhor despacho de energia em função de seus valores para atender centros de consumo, abastecendo-o a partir das distribuidoras conforme a demanda solicitada.

## 3. Método programação dinâmica

O método programação dinâmica, consiste na divisão do problema em subproblemas, os quais são resolvidos separadamente. A solução do problema é então obtida pela combinação das soluções dos subproblemas. De acordo com [4], a programação dinâmica é lida com sistemas dinâmicos, ou seja, sistemas que evoluem no tempo, o que o torna um problema sequencial, devendo ser executado por estágios.

### 3.1. Elementos básicos da programação dinâmica

A seguir são apresentados alguns elementos básicos da programação dinâmica:

- Estado: representa a configuração do sistema em determinado instante;
- Estágio: representa a transição entre dois pontos consecutivos de operação do sistema;

- Decisão: em cada estágio existem várias combinações possíveis, onde apenas uma deverá ser escolhida como decisão no estágio. A decisão tomada em um estágio influenciara na decisão do próximo estágio;
- Custo elementar: é o custo associado a cada decisão tomada em cada estágio;
- Estágio inicial: é o estágio em que se encontra o sistema no início (0);
- Equação recursiva de transição de estado: trata-se da equação que define o estado do sistema entre dois estágios consecutivos para uma dada decisão;
- Política de decisão: trata-se da sequência de decisões tomadas do estágio inicial ao estágio final;
- Função objetivo: é a soma dos custos de cada estágio considerando todo o período em estudo.

Em [5] apresenta-se o problema clássico da programação dinâmica, onde deseja-se encontrar o caminho ótimo em um grafo, entre os nós A e N, conforme apresentado na Fig. 1. Este caminho deve representar a trajetória com menor custo. No primeiro estágio, deve-se tomar a decisão entre os nós 10, 11 e 12. Tomando como escolha de decisão o nó 11, a próxima decisão deve ser tomada entre os nós 20, 21 e 22. Esta estratégia segue até o último estágio, momento em que N é alcançado. Desta maneira, os nós A>>11>>22>>32>>41>>N correspondem a trajetória com menor custo.

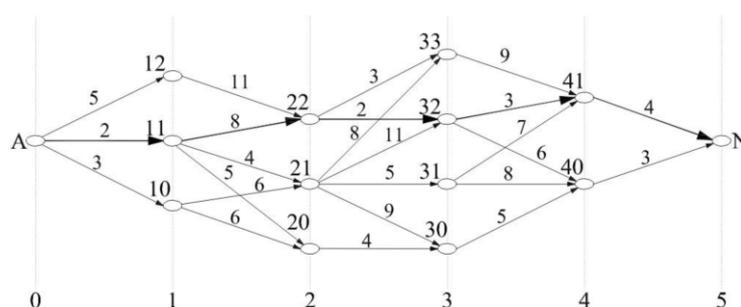


Fig. 1. Problema clássico de programação dinâmica. Fonte [5].

O problema pode ser representado por um conjunto de nós:  $[P_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ; e uma matriz de custo:  $[C_{ij}]$ , onde  $C_{ij}$  representa o custo para ir do nó  $P_i$  para o nó  $P_j$ . O caminho ótimo será o menor custo para ir do nó inicial  $P_A$  para o nó final  $P_N$ .

Ao considerarmos  $g(i, j)$  a função que descreve o custo para mover do nó  $P_i$  para o nó  $P_j$  e S os nós encontrados nos estágios, temos:

$$g(i, j) = g(i, s) + g(s, j) \quad (1)$$

Para encontrar a trajetória ótima entre os nós  $P_i$  e  $P_j$ , será necessário encontrar  $g(i, j)$  e um conjunto S que satisfaça a seguinte equação:

$$g(i, j) = \min_s [g(i, s) + g(s, j)] \quad (2)$$

Caso nenhuma restrição seja imposta, a eq. (2) estabelece o problema geral de busca em grafo. Caso o grafo apresente apenas alguns nós diretamente conectados, a busca deverá ser sequencial.

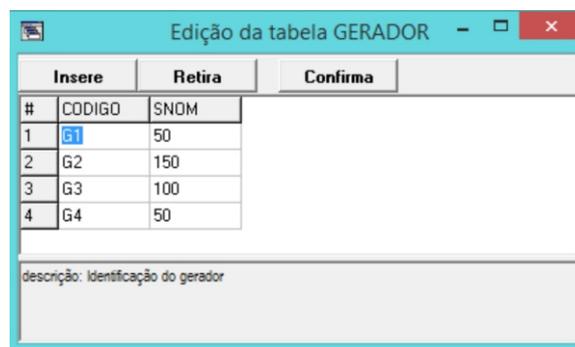
#### 4. Aplicação do método programação dinâmica

Para aplicação do método de programação dinâmica utilizou-se o software didático OTIMIZA [6]. O software apresenta uma metodologia didática e de fácil aplicação com objetivo de estudos de caso em Sistemas Elétricos de Potência. Os métodos utilizados no sistema baseiam-se na utilização de técnicas de programação matemática, que tem por escopo a otimização de algumas funções objetivo, sujeitas a um conjunto de restrições.

Foram realizadas simulações de três situações distintas, representadas a partir da simulação do comportamento da forma como será energizado três tipos de cargas em função de quatro geradores pré-estabelecidos. Serão utilizadas propositalmente uma carga inferior a capacidade máxima dos geradores (250 MVA), uma carga com potência igual a capacidade dos geradores (350 MVA), e por último uma carga superior a capacidade dos geradores (360 MVA).

Primeiramente é necessário identificar as fontes geradoras que devem ser utilizadas para alimentar a carga. Neste estudo não serão definidos os tipos de fontes geradoras, ou seja, se elas são hidroelétricas, solar, biomassa, e ou eólica, sendo então simplesmente definidas como fontes geradoras, conforme demonstra a Fig. 2, onde foram inseridas quatro fontes geradoras e suas potências nominais, sendo:

- Fonte geradora 1 (G1): Potência nominal 50 MVA;
- Fonte geradora 2 (G2): Potência nominal 150 MVA;
- Fonte geradora 3 (G3): Potência nominal 100 MVA;
- Fonte geradora 4 (G4): Potência nominal 50 MVA.



#	CODIGO	SNOM
1	G1	50
2	G2	150
3	G3	100
4	G4	50

descrição: Identificação do gerador

**Fig. 2. Geradores e suas potências. Fonte: [6].**

Após a definição do número de fontes geradoras e suas potências, são definidos os Terminais de Ajuste de Potencial (TAP) e seus custos. Os TAP são os estágios proporcionais em relação a sua potência total, ou seja, são os estágios em que os transformadores podem ser regulados para melhor se adaptar a carga, assim para cada um desses estágios é definido um custo de operação, conforme apresentado na Fig. 3.

Os TAP e seus custos estão definidos da seguinte forma:

- Gerador G1, possui 3 TAPs:
  - TAP 01: 20MVA com um custo de operação 50 u.m. (unidades monetárias);
  - TAP 02: 30MVA com um custo de operação 72 u.m.;
  - TAP 03: 50MVA com um custo de operação 120 u.m.;
- Gerador G2, possui 3 TAPs:
  - TAP 01: 50MVA com um custo de operação 120 u.m.;
  - TAP 02: 100MVA com um custo de o peração 240 u.m.;

- TAP 03: 150MVA com um custo de operação 360 u.m.;
- Gerador G3, possui 3 TAPs:
  - TAP 01: 50MVA com um custo de operação 120 u.m.;
  - TAP 02: 70 MVA com um custo de operação 168 u.m.;
  - TAP 03: 100 MVA com um custo de operação 240 u.m.;
- Gerador G4, possui 3 TAPs,
  - TAP 01: 20MVA com um custo de operação 50 u.m.;
  - TAP 02: 30MVA com um custo de operação 72 u.m.;
  - TAP 03: 50MVA com um custo de operação 120 u.m.;

#	GER_ID	TAP	CUSTO
1	G1	20	50
2	G1	30	72
3	G1	50	120
4	G2	50	120
5	G2	100	240
6	G2	150	360
7	G3	50	120
8	G3	70	168
9	G3	100	240
10	G4	20	50
11	G4	30	72
12	G4	50	120

descrição: Custo de operação no patamar  
unidade: \$

Fig. 3. Tap de cada Gerador e seus custos. Fonte: [6].

Após a definição do número de Geradores os quais estarão em operação para suprir a necessidade da carga e seus respectivos TAP, bem como os custos destes, o próximo passo é a definição da carga que será atendida em MVA, conforme demonstrado na Fig. 4.

#	DEMANDA	CARGA
1		250

descrição: Demanda a ser atendida pelos geradores  
unidade: MVA

Fig. 4. Demanda a ser atendida pelos geradores, em MVA. Fonte: [6].

#### 4.1. Simulação com carga inferior - 250 MVA

Com a simulação através do programa OTIMIZA, obtivemos as seguintes informações:

- 1) Política Ótima de Despacho da Geração: Atendeu as necessidades da carga. A geração forneceu potência sem excedentes, com capacidade inferior a máxima da geração. A Tabela 1 apresenta os valores despachados por cada fonte geradora.

**Tabela 1. Política ótima de despacho (despacho = demanda)**

Gerador	Despacho (MVA)	CUSTO (\$)
G1	0,0	0,00
G2	100,0	240,00
G3	100,0	240,00
G4	50,0	120,00
Total	250,0	600,00

- 2) Melhor política de despacho da geração em que o despacho é MENOR que a demanda: Não atendeu as necessidades da carga. A geração forneceu potência inferior ao necessário. A Tabela 2 apresenta os valores despachados por cada fonte geradora.

**Tabela 2. Melhor política de despacho (despacho < demanda)**

Gerador	Despacho (MVA)	CUSTO (\$)
G1	0,0	0,00
G2	150,0	360,00
G3	70,0	168,00
G4	20,0	50,00
Total	240,0	578,00

- 3) Melhor política de despacho da geração em que o despacho é MAIOR que a demanda: Atendeu as necessidades da carga com excedentes. A geração forneceu potência superior ao necessário. A Tabela 3 apresenta os valores despachados por cada fonte geradora.

**Tabela 3. Melhor política de despacho (despacho > demanda)**

Gerador	Despacho (MVA)	CUSTO (\$)
G1	30,0	72,00
G2	100,0	240,00
G3	100,0	240,00
G4	30,0	72,00
Total	260,0	624,00

#### 4.2. Simulação com carga de 350 MVA

A simulação através do programa OTIMIZA, resultou nas seguintes informações:

- 1) Política Ótima de Despacho da Geração: Atendeu as necessidades da carga. A geração forneceu potência sem excedentes, com capacidade máxima da geração. A Tabela 4 apresenta os valores despachados por cada fonte geradora.

**Tabela 4. Política ótima de despacho (despacho = demanda).**

Gerador	Despacho (MVA)	CUSTO (\$)
G1	50,0	120,00
G2	150,0	360,00
G3	100,0	240,00
G4	50,0	120,00
Total	350,0	840,00

- 2) Melhor política de despacho da geração em que o despacho é MENOR que a demanda: Não atendeu as necessidades da carga. A geração forneceu potência inferior ao necessário. A Tabela 5 apresenta os valores despachados por cada fonte geradora.

**Tabela 5. Melhor política de despacho (despacho < demanda).**

Gerador	Despacho (MVA)	CUSTO (\$)
G1	30,0	72,00
G2	150,0	360,00
G3	100,0	240,00
G4	50,0	120,00
Total	330,0	792,00

#### 4.3. Simulação com carga superior - 360 MVA

- 1) Política Ótima de Despacho da Geração: Não foi possível obter política ótima de despacho da geração, onde o despacho é igual a demanda.
- 2) Melhor política de despacho da geração em que o despacho é MENOR que a demanda: Não atendeu as necessidades da carga. A geração forneceu potência inferior ao necessário. A Tabela 6 apresenta os valores despachados por cada fonte geradora.

**Tabela 6. Melhor política de despacho (despacho < demanda).**

Gerador	Despacho (MVA)	CUSTO (\$)
G1	50,0	120,00
G2	150,0	360,00
G3	100,0	240,00
G4	50,0	120,00
Total	350,0	840,00

## 5. Conclusões

A partir deste estudo, pode-se verificar a grande valia do método programação dinâmica quando se trata de situações como o despacho de geração, onde encontra-se envolvidas variáveis com características dinâmicas. O estudo proporcionou uma visão clara da otimização do despacho de energia elétrica, frente às diversas situações envolvendo várias fontes de geração. Também é possível identificar situações em que a geração não é compatível com a carga, sendo a carga superior da capacidade máxima da geração.

Ficou claro, que não utilizar ferramentas computacionais com métodos adequados pode levar a erros graves ao realizar definições de despacho de geração, podendo causar danos irreversíveis ao sistema elétrico brasileiro, assim como acarretar em prejuízos enormes para os agentes envolvidos, provocando transtorno a todo o sistema. Em face disto, a utilização da programação dinâmica como ferramenta, pode oferecer uma contribuição valiosa ao processo decisório, orientando pela eficácia focada em resultado operacional e financeiro.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM pela oportunidade de estar realizando a disciplina Otimização

Aplicada a Sistema Elétrico. Cabe agradecimentos aos colegas da Faculdade de Engenharia da Universidade de Misiones por suas contribuições a este artigo.

## Referências

- [1] Módulo 8 – PRODIST. Resolução Normativa ANEEL N° 956/2021.
- [2] Operador Nacional do Sistema – ONS. <http://www.ons.org.br>. Acesso em maio de 2022.
- [3] T. G. Siqueira, “Comparação entre diferentes abordagens de programação dinâmica no planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de potência”. Tese – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de computação. Campinas, 2009.
- [4] R. O. C. Scarceli, “Programação dinâmica aplicada a otimização individualizada e desacoplada das usinas hidrelétricas de sistemas hidrotérmicos”. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [5] A. P. D. Poz , G. M. Vale , “Algoritmo de programação dinâmica: fundamentos e aplicações em extração de feições”. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Disponível em: <https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f002.pdf>. Acesso em 15 de novembro de 2019.
- [6] N. Kagan , H. P. Schmidt , C. C. B. Oliveira, “Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência”, Material de apoio. Programa Otimize – software educacional. Blucher. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/livro/detalhes/metodos-de-otimizacao-aplicados-a-sistemas-eletricos-de-potencia-636>.