

Aplicação do Método de Programação Dinâmica através do *software* OTIMIZA para o Despacho de Geração Distribuída em Microrrede da UFSM

Tiago Francisco Hinterholz*. Diego Dorneles Goulart**. Daniel Pinheiro Bernardon***. Mauricio Sperandio****.

**Doutorando em Engenharia Elétrica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, Brasil.
(e-mail: fh.tiago@gmail.com)*

***Doutorando em Engenharia Elétrica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, Brasil.
(e-mail: diego.goulart1976@gmail.com)*

*** *Professor Doutor Associado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, Brasil.
(e-mail: dpbernardon@ufsm.br)*

**** *Professor Doutor Associado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, Brasil.
(e-mail: mauricio.sperandio@ufsm.br)*

Abstract: In carrying out the planning of the energy operation of an electrical system, it is sought to establish the participation of each generating unit in the electrical system, in order to ensure the supply of demand at the lowest possible operating cost, respecting technical restrictions. In this sense, the Dynamic Programming (DP) method, widely used in the electricity sector, is presented to determine the optimal dispatch of generating units, observing factors such as operating cost and maximum permissible power of each unit. And a case study is presented, which seeks to prioritize the application process for the dispatch of distributed generation (DG) of electric energy, from diesel generators, in a microgrid at the Federal University of Santa Maria (UFSM). For that, the results obtained in the simulations with the computer program OTIMIZA were analyzed, in order to obtain the optimized dispatch of the DG for the UFSM microgrid. With this, it is expected to meet the specified demand within normal operating conditions and with the lowest possible operating cost, avoiding demand overruns.

Resumo: Na realização do planejamento da operação energética de um sistema elétrico busca-se estabelecer a participação de cada unidade geradora no sistema elétrico, a fim de assegurar o suprimento da demanda ao menor custo operacional possível, respeitando as restrições técnicas. Neste sentido, apresenta-se o método de Programação Dinâmica (PD), largamente utilizada no setor elétrico, para determinar o despacho ótimo de unidades geradoras, observando fatores como custo de operação e potência máxima admissível de cada unidade. E expõe-se um estudo de caso, onde se busca hierarquizar o processo de aplicação para o despacho de geração distribuída (GD) de energia elétrica, a partir de geradores a diesel, em microrrede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Para tanto, foram analisados os resultados obtidos nas simulações com o programa computacional OTIMIZA, de modo a obter-se o despacho otimizado da GD para a microrrede da UFSM. Com isso, espera-se atender a demanda especificada dentro das condições normais de operação e com o menor custo operacional possível evitando as ultrapassagens de demanda.

Keywords: Distributed Generation Dispatch; Dynamic Programming; OTIMIZA; Microgrid; UFSM.

Palavras-chaves: Despacho da Geração Distribuída; Programação Dinâmica; OTIMIZA; Microrrede; UFSM.

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica realiza-se por meio da utilização de diferentes fontes primárias, como por exemplo, as fontes não renováveis (carvão, gás natural, óleo diesel, etc.) e as fontes renováveis (hidro, eólica, solar, biomassa, etc.). [1].

E como o foco deste artigo é analisar o processo de aplicação para o despacho de geração distribuída (GD) de energia elétrica, a partir de geradores termelétricos a diesel, na microrrede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), expõem-se, introdutoriamente, algumas características sobre a geração termelétrica de energia elétrica.

A principal característica de aplicação de geradores termelétricos relaciona-se com a sua proximidade aos centros de carga, eliminando assim a necessidade de linhas muito extensas, o que reduz as perdas associadas à transmissão da energia e auxilia na manutenção dos parâmetros de qualidade da rede. Elas são divididas em dois grandes grupos: as termelétricas convencionais, que utilizam insumos fósseis combustíveis, como por exemplo, o carvão mineral, o óleo combustível (diesel, etc.), o gás natural, entre outros, e as termelétricas nucleares, que usam combustíveis fósseis, como por exemplo, o urânio.

Outra característica dos geradores termelétricos relaciona-se com o custo operacional, onde as usinas termelétricas, também presentes no SIN, são geralmente utilizadas em períodos de baixa geração hídrica ou em períodos que apresentam pouca afluência de chuvas para atender a potência demandada, evitando-se cortes de cargas, para ambos os grupos, que é bastante elevado em função dos gastos com combustível. [2], [3].

O custo de produção de uma usina termelétrica é mais elevado do que os custos de uma hidrelétrica, sobretudo, devido ao custo de combustível. Além disso, as termelétricas são mais difíceis de serem operadas e conservadas, e seus custos com funcionários, manutenção e consertos são muito maiores que nas hidrelétricas. [2], [3].

Além disso, os geradores termelétricos convencionais são grandes emissores de gases poluentes, enquanto que as nucleares possuem um processo complexo de geração. [1], [2].

Assim, este artigo contextualiza um estudo de caso descrito com objetivo de realizar-se a otimização do despacho de geração distribuída (GD), a partir de geradores termelétricos a diesel, na microrrede de energia elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) utilizando-se o método de Programação Dinâmica (PD), aplicando-se o método de PD quando o tempo ou uma sequência de decisões são necessários.

Então, busca-se estabelecer uma trajetória de evolução do Sistema elétrico que otimizará os custos em valor presente líquido (VPL), através de um despacho otimizado da GD (com geradores termelétricos a diesel) para a microrrede da UFSM, esperando-se atender a demanda especificada dentro das condições normais de operação e com o menor custo operacional possível, com uso do programa computacional

OTIMIZA para resolver um problema de PD. Por isso, as usinas termelétricas, também presentes no SIN, são geralmente utilizadas em períodos de baixa geração hídrica ou em períodos que apresentam pouca afluência de chuvas para atender a potência demandada, evitando cortes de cargas. [2], [3]. E esta trajetória de evolução do sistema, com mínimo custo total VPL é denominada política ótima. [4].

A seguir é apresentada uma breve conceituação do método de Programação Dinâmica.

2. PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A Programação Dinâmica (PD) em sua essência relaciona-se com o Princípio da Otimalidade, de Richard Bellman. Ao contrário de outros ramos da Programação Matemática, não pode ser definido um único algoritmo capaz de resolver diretamente todos os problemas de programação dinâmica [5].

De uma forma geral um problema de otimização com n variáveis de decisão é transformado em n subproblemas cada um deles com apenas uma variável de decisão (no caso unidimensional). O esforço computacional cresce exponencialmente com o número de variáveis, porém, apenas linearmente com o número de subproblemas. Assim, podem ser obtidas reduções significativas no esforço computacional quando comparado a outras técnicas de otimização [5].

A PD é um método que se aplica às situações que exijam decisões sequenciais, onde se resolvem problemas pela sua decomposição em subproblemas, sendo solucionados de estágio por estágio, oferecendo algumas vantagens em relação a outras técnicas de otimização. O método de Programação Dinâmica permite transformar um problema de decisão sequencial (em múltiplos estágios) contendo diversas variáveis interdependentes em uma série de subproblemas contendo poucas variáveis. [5].

A transformação é invariante preservando o número de soluções viáveis o valor da função objetivo associado a cada uma delas e, portanto, a própria solução ótima. Pode tratar funções descontínuas, não diferenciáveis, não convexas, determinísticas ou estocásticas, a função objetivo deve, entretanto, ser separável e monotônica. [5].

E a principal característica da PD é a utilização na resolução do problema geral através da decomposição em etapas de decisão, que se configuram em subproblemas do problema geral. Essa característica é chamada de *closed loop* e possibilita que, dado algum desvio na condição ótima, uma nova trajetória ótima pode ser seguida daquele estágio em diante, partindo-se do estado não ótimo. [1], [4].

Outras características importantes da PD estão na facilidade em contornar funções matemáticas não lineares, não contínuas e não convexas. A grande dificuldade na aplicação da PD está na dimensão dos problemas. Sem o uso de simplificações, só pode ser aplicada a um pequeno número de sistemas. [1], [4].

A modelagem da PD é caracterizada por um processo sequencial baseado no processo Markoviano, visto que “um processo é Markoviano, quando o futuro depende apenas da situação presente, ou seja, o passado não tem nenhuma

influência nas decisões futuras”. [5]. E esta característica torna o processo Markoviano indispensável para que o Princípio da Otimalidade de Bellman seja aplicado, uma vez que 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.”. [4] [5].

Desta forma, para estabelecer a um processo ótimo de despacho em cada estágio, é necessário conhecer apenas o nível de geração de energia elétrica no início do período alisado. E a aplicação de PD para o problema de despacho de geração distribuída em sistema elétrico tem como base o fato das decisões tomadas em dado instante não provocarem mudanças em custos dos instantes posteriores. Os passos básicos do método são [4]:

1º Fixa-se ordenadamente um ano limite.

2º Comparam-se os subconjuntos de alternativas de evolução com mesmos estados posteriores e descartam-se os de custo operacional superiores.

3º Repete-se o procedimento até o final do período de estudo.

E apresentando um exemplo para um determinado problema, ele poderá ser aberto em cinco etapas para resolução, tais como Etapa1, Etapa2, Etapa3, Etapa4 e Etapa5 que estão ilustradas conforme a Fig. 1.

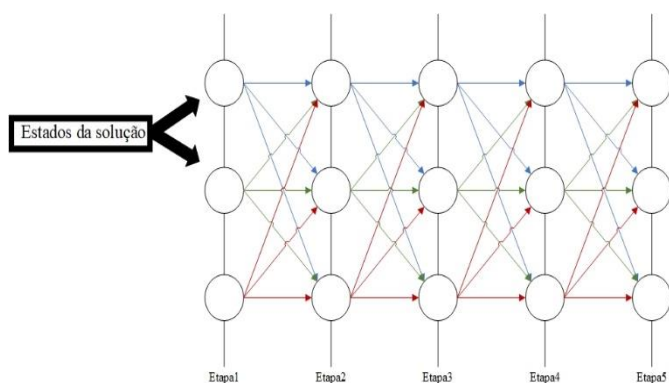


Fig. 1. Componentes da Programação Dinâmica.

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. Desse modo, cada etapa do problema é resolvida a partir da solução de etapas menores, ou então, de subproblemas provenientes do problema original [4].

Desta forma, a característica que difere a PD do algoritmo recursivo é a tabela que armazena as soluções dos subproblemas na PD. Esta tabela torna a PD mais eficiente que o algoritmo recursivo, que estabelece uma recorrência da solução de cada subproblema, o que torna sua solução lenta e ineficiente. Observa-se que o problema geral da PD possui

uma estrutura onde a solução de qualquer etapa deve conter soluções dos subproblemas antecedentes [5], [6].

Matematicamente, a forma geral recursiva do problema de programação dinâmica, de acordo com o princípio da otimalidade apresentado em 1, para um problema de minimização, pode ser dada por [4]:

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

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.

Em 1, tem-se o método de PD, de forma recursiva, utilizada a partir da etapa final em direção à etapa inicial, quando se obtém a trajetória ótima. Entre as formas de utilização da PD, tem-se a forma recursiva para resolver subproblemas sequencialmente e suas soluções são armazenadas (em uma tabela de soluções). [6].

Para isso, é necessário resolvê-los na ordem certa para que sempre que a solução para um subproblema seja solicitada, já esteja disponível na referida tabela de soluções. [6].

A PD é particularmente útil em problemas para os quais dividir e conquistar parece produzir um número exponencial de subproblemas, mas há realmente apenas um pequeno número de subproblemas repetidos exponencialmente e frequentemente. [6].

Nesse caso, faz sentido calcular cada solução pela primeira vez e armazená-la em uma tabela para uso posterior, em vez de recomputá-la recursivamente toda vez que for necessária. [6].

Esse método, em algumas aplicações, pode ser realizado de forma progressiva, neste caso, da etapa inicial para a final [4].

A seguir é apresentado o estudo de caso despacho otimizado da GD (com geradores termelétricos a diesel) para a microrrede da UFSM.

3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso proposto corresponde a um problema de PD, referente à determinação do melhor despacho de 3 geradores distribuídos com unidades de geração termelétrica a diesel para o atendimento da ultrapassagem de demanda da uma microrrede da UFSM sendo esta ultrapassagem, valores que variam entre 100 kW e 1000 kW.

Para alimentar esta carga equivalente, dispõe-se de três usinas geradoras (G1, G2, G3) com capacidade máxima de despacho de 1.10 MVA, sendo 500 kVA, 360 kVA, e 250 kVA respectivamente.

A Fig. 2, a seguir, ilustra a microrrede para o estudo de caso proposto.

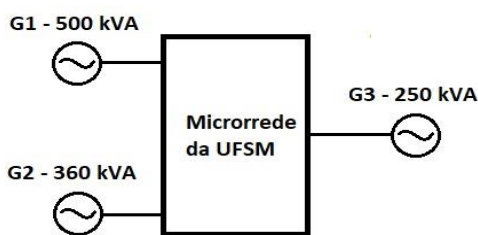


Fig. 2. Estudo de caso proposto.

No programa computacional OTIMIZA são inseridos dados de entrada do estudo de caso, como por exemplo, a demanda total a ser atendida pelos geradores igual 600 kVA e os pontos da função de custo para cada unidade geradora candidata, como segue na Tabela 1.

Tabela 1 - Custos de unidades de geração.

Gerador (ID)	TAP	CUSTO
G1	250	500
G1	500	1000
G2	360	500
G2	180	250
G3	125	100
G3	250	200

A Tabela 2 apresenta o despacho máximo das unidades geradoras candidatas (G1, G2 e G3) parametrizadas no software OTIMIZA para o estudo de caso proposto.

Tabela 2 - Despacho máximo dos geradores.

Código	SNOM
G1	0.500
G2	0.360
G3	0.250

Cada etapa de decisão na aplicação de PD corresponde ao comissionamento de um gerador, ou seja, a avaliação de seu despacho. Desta forma, partindo do primeiro até o último gerador, o custo operacional ótimo pode ser representado através da equação recursiva 2:

$$\min f_i = f_{i-1}(D - P_i) + F(P_i), i = 1, \dots, 5 \quad (2)$$

Onde:

- f_i : custo acumulado do gerador i ;
- f_{i-1} : custo acumulado do gerador $i - 1$;
- $F(P_i)$: custo da unidade de geração i ;
- i : número do gerador.

Por meio 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. O OTIMIZA permite otimizar este problema de PD, determinando o melhor estágio utilizado por cada gerador, a fim de atender a carga total presente na barra, respeitando a capacidade de despacho de cada unidade geradora e minimizando os custos totais de geração no sistema.

4. RESULTADOS

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. [7]

Por meio do método de PD é possível estabelecer a melhor condição de operação de um sistema elétrico em conformidade com determinado objetivo. Neste trabalho em específico, o objetivo é encontrar o despacho ótimo de cada unidade geradora, atendendo a ultrapassagem de demanda do sistema e o critério do mínimo custo possível.

Na Fig. 3 é apresentada a busca da trajetória ótima de geração no programa OTIMIZA.

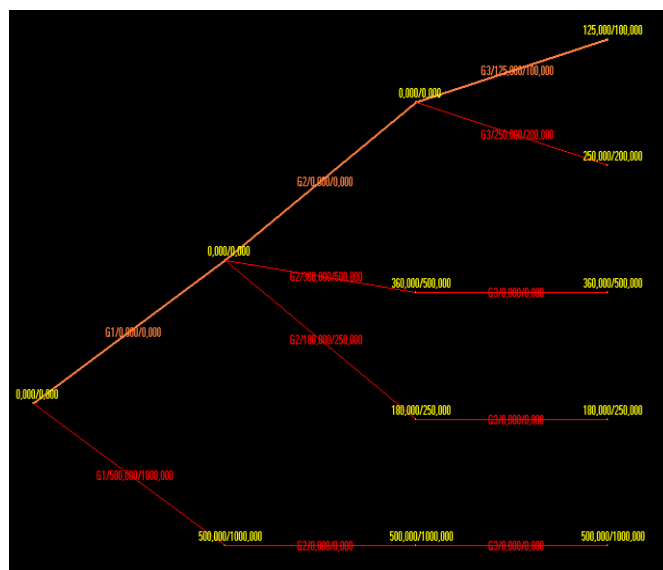


Fig. 3. Busca da trajetória ótima de geração.

A combinação ótima de comissionamento entre os geradores candidatas é apresentada através de um relatório, no qual é mostrada a política ótima de despacho.

Como esta combinação nem sempre atinge a demanda com exatidão, o relatório de saída do OTIMIZA 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.

Na Fig. 4 apresenta-se o relatório de saída do programa.

```
-----  
Programação Dinâmica: Despacho da Geração  
-----  
Demanda alvo: 0,6 MVA  
-----  
Geradores definidos  
  
G1: Snom = 0,5 MVA  
TAP (MVA)      Custo($)  
0,0             0,00  
250,0           500,00  
500,0           1000,00  
  
G2: Snom = 0,4 MVA  
TAP (MVA)      Custo($)  
0,0             0,00  
360,0           500,00  
180,0           250,00  
  
G3: Snom = 0,3 MVA  
TAP (MVA)      Custo($)  
0,0             0,00  
125,0           100,00  
250,0           200,00  
-----
```

Fig. 4. Relatório de saída do programa OTIMIZA.

A árvore de busca da Fig. 3 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 [4].

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.

Finalmente, verifica-se que por meio da PD é possível escolher estágios de despacho para as unidades geradoras, de modo a atender a ultrapassagem de demanda ao menor custo.

Desta forma, para suprir a demanda de 600 kVA, a política ótima de despacho consiste em despachar as unidades geradoras G2 em 360 kVA, e a G3 em 250 kVA, e não despachar a unidade G1. A totalidade dos despachos implica em um custo total, aproximadamente, no valor de R\$ 700,00.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise de problemas de planejamento da operação energética tem-se por objetivo de determinarem-se estratégias de despacho da geração de energia elétrica em sistemas elétricos buscando-se minimizar os custos de operação esperados.

Desta forma, utilizou-se o método de Programação Dinâmica, para resolver este problema mais complexo, por meio de um conjunto de decisões tomadas em multiestágios, permitindo-se fragmentar o problema do despacho em etapas sequenciais, nas quais cada uma possuía um estado que, a partir da sua transição, exercia influência nas decisões tomadas.

Assim, o estudo de caso proposto corresponde a um problema de PD, referente à determinação do melhor despacho de GD com unidades de geração termelétrica a diesel para o atendimento de cargas da microrrede da UFSM, onde se obteve sucesso, com uso do programa computacional

OTIMIZA, no atendimento da demanda especificada dentro das condições normais de operação e com o menor custo operacional possível. [4].

Na resolução do estudo de caso, a sequência de decisões obtidas no OTIMIZA caracterizou a política ótima de planejamento a ser adotada, representando um custo mínimo de cerca de R\$ 700,00. Neste caso, apresentou-se um conjunto de três centrais geradoras a serem despachadas, a fim de atender uma demanda de 600 kVA, respeitando as restrições técnicas de cada usina. Determinou-se, portanto, o quanto de energia cada unidade geradora deveria despachar, fazendo-se uma análise técnico-financeira para otimizar o despacho da geração na microrrede da UFSM.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001, e do INCT-GD (através do CNPq sob o processo número 465640/2014-1, da CAPES sob o processo número 23038.000776/2017-54 e da FAPERGS sob o processo número 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

- [1] Locatelli, F. A.; Bessa, M. R. (2016), *Optimization of hydroelectric power plants operation with application of dynamic stochastic programming in vector language*, Espaço Energ., no. 25, pp. 1–11.
- [2] Finardi, E. C. (1999). *Planejamento e Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Computação de Alto Desempenho*. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- [3] Scarcelli, R. de O. C.. (2012). *Programação Dinâmica Aplicada à Otimização Individualizada e Desacoplada das Usinas Hidrelétricas de Sistemas Hidrotérmicos*. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- [4] Kagan, N. et al. (2009). *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*. São Paulo: Blucher.
- [5] Campello, R. E. (2002). *Programação Dinâmica Determinística e Estocástica*. XXXIV SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 8 a 11 de novembro 2002, Rio de Janeiro - RJ.
- [6] Parberry, I. (1995). *Problems on Algorithms*. Prentice Hall.
- [7] Hinterholz, T. F. (2018). *Controle inteligente do despacho de geração distribuída para atendimento dos limites de demanda de uma microrrede*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.