APLICAÇÃO DO MÉTODO DE NEWTON-RHAPSON PARA RESOLVER PROBLEMA DE DESPACHO ECONÔMICO ENVOLVENDO GERAÇÃO TÉRMICA DE ENERGIA ELÉTRICA

Edgar Della Giustina (Faculdade de Tecnologia SENAI CIC) edg23@hotmail.com
Fabio da Silva Avelar (Faculdade de Tecnologia SENAI CIC) fabiotfi@gmail.com

Resumo: O objetivo desse artigo foi a implementação computacional através de uma programação no software MATLAB® com o intuito de mostrar o custo total de uma unidade térmica geradora de energia elétrica. Além disso, também mostrar os valores das perdas totais de potência na transmissão. Para fazer a implementação foi considerada as funções de custos e a função de perdas por transmissão relativas ao caso de uma termoelétrica. Para fazer essa aplicação foi utilizado o Método de Newton-Rhapson, que de acordo com a literatura é o Método que tem melhor convergência em problemas envolvendo sistemas de potências. A implementação mostrou-se interessante pelo fato de ser intuitiva e porque traz uma contribuição com estimativas de gastos de uma empresa, principalmente das termoelétricas, ajudando na economia fazendo uma previsão de custos.

Palavras-chave: Despacho Econômico, Termoelétrica, Newton-Rhapson.

METHOD OF APPLICATION OF NEWTON-RHAPSON ORDER TO SOLVE PROBLEM INVOLVING ECONOMIC GENERATION ELECTRIC POWER THERMAL

Abstract: The aim of this article was the computational implementation through programming in MATLAB® software in order to show the total cost of a thermal generating unit of electricity. Furthermore, also show the values of the total power loss in transmission. To make the implementation was considered the cost functions and the transmission loss of function for the case of a power plant. To do this application was used Newton-Rhapson Method, which according to literature is that the method has better convergence problems involving powers systems. The implementation proved to be interesting because it is intuitive, because it brings a contribution to estimates of expenses of a company, especially of thermal, helping the economy doing a cost forecast.

Keywords: Economic Dispatch, Thermoelectric, Newton- Rhapson.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia elétrica teve início no começo do século XX. Desde do começo, a produção e distribuição de energia elétrica foi motivo de muita disputa no cenário brasileiro, eram exigidos grandes investimentos em infraestrutura e equipamentos técnicos (OLIVEIRA, 2012). Essas disputas e investimentos dá-se pelo fato de que para se obter energia elétrica em grande esfera são necessários investimentos em usinas de porte alto. De acordo Souza (2010), existem diferentes modos de produzir energia elétrica: nas usinas nucleares por meio de minerais radioativos, nas usinas hidroelétricas que utilizam a queda da água e nas usinas termoelétricas através dos combustíveis extraídos de várias formas.

Por causa da desregulamentação, a energia torna-se um tipo de commodity e atualmente a obsessão dos negociadores é a venda e o lucro obtido, tendo em vista que assim a energia pode ser considerada um bem de consumo. Dessa forma, procura-se despachar energia com a maior eficácia possível diminuindo as perdas de transmissão e os menores custos na geração dessa energia, expandindo os lucros (LUCIANO, 2010).

Para conseguir maiores lucros com os menores custos possíveis na geração, maior confiança e boas condições operacionais, os sistemas elétricos são interconectados fazendo compartilhamento de reserva de energia, aprimorando a estabilidade do sistema e operando em condições de emergência. Para que isso ocorra, a questão de otimização do despacho econômico de energia elétrica é fundamental para atender as exigências de qualidade e eficiência dos geradores de energia elétrica.

Grande parte dos problemas de otimização envolvendo sistemas de potência, entre eles os de despacho econômico, apresentam dificuldades por possuírem particularidades complexas e não-lineares pelo fato de ter algumas restrições, por exemplo de mínimo e máximo de potência. A partir do momento que apareceram as questões voltadas a despacho econômico, foram desenvolvidos e adaptados vários métodos numéricos que resolvessem essas questões (COELHO e MARIANI, 2006).

Na definição do ponto ótimo para a operação do sistema elétrico brasileiro, o planejamento, a programação e o despacho são executados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sendo que o planejamento é dividido em dois grupos: o planejamento da operação e o planejamento da expansão do sistema (BORGES, 2010). O intuito do planejamento da operação desses sistemas é atender as exigências do mercado com confiabilidade e com o menor custo final possível (SANTOS, 2001). Para simular e planejar as diferentes situações, os métodos fundamentados em soluções numéricas são os mais utilizados e mais confiáveis, propiciando a simulação de modelos de sistemas mais completos com soluções precisas (ROMANI, 2014).

O desenvolvimento de simulações envolvendo sistemas elétricos torna-se um desafio técnico quando trata-se de sistemas de grande porte. No que diz respeito ao modelamento matemático, é evidente uma certa complexidade pelo fato de envolver uma questão de otimização em um sistema de grande porte, trabalhando com várias incógnitas de despacho econômico e limitações tecnológicas, além disso as equações relativas ao problema não são lineares (LOPES, 2007).

No caso desse trabalho a solução é determinada pelo Método interativo de Newton-Rhapson que tem como excelência ser robusto porque geralmente obtém convergência mesmo com poucas interações. O Método utiliza uma matriz que tem como principais características ser simétrica, complexa, quadrada e mais de 95% dos elementos são nulos, após determinar essa matriz é montada a matriz jacobiana. É atualmente o método mais utilizado em sistemas de potências (BORGES, 2005).

Esse artigo mostra o desenvolvimento de uma implementação computacional da aplicação do Método de Newton-Rhapson para problema envolvendo despacho econômico, foi simulado um caso que considerou as equações relacionadas à uma termoelétrica e por fim, foi feita uma conclusão sobre o trabalho. O software utilizado para fazer a implementação foi o MATLAB®, de acordo com (PALM, 2011) o MATLAB® é utilizado para simulação de processos em sua maioria envolvendo análises numéricas, trata-se de um software programável que demonstra uma base lógica de outras linguagens de programação.

2. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesse tópico é demostrado o passo a passo para criação de um script para determinar o ponto ótimo de operação para mais de uma geradora e calcular o valor do custo total de operação e as perdas totais por transmissão de uma termoelétrica utilizando o Método de Newton-Rhapson. Para utilização do Método para esse caso a implementação foi feita com base no livro de Wood e Wollenberg (2012).

Para a implementação considerou-se 3 unidades geradoras termoelétricas para atender uma carga de 938 MW, considerando uma tolerância de 1 MW e a expressão simplificada das perdas de transmissão (PL) é mostrada na Equação (1):

$$\mathrm{PL} = 0.000009 * \mathrm{p1}^2 + 0.0001 * \mathrm{p2}^2 + 0.0002 * \mathrm{p3}^2 \ (\mathrm{MW}) \quad (1)$$

Os limites máximos e mínimos de cada geradora são mostrados abaixo na Tabela 1 junto com a função custo de cada unidade.

Tabela 1 – Cargas máximas e mínimas de cada unidade geradora.

Unidade geradora 1	$p1_{min} = 100\ MW;\ p1_{max} = 500\ MW$ $F_1(p1) = 627 + 9.13 * p1 + 0.00214 * p1^2$
Unidade geradora 2	$p2_{min} = 400\ MW;\ p2_{max} = 900\ MW$ $F_2(p2) = 273 + 6.27 * p2 + 0.0009 * p2^2$
Unidade geradora 3	$p3_{min} = 50\ MW;\ p3_{max} = 200\ MW$ $F_3(p3) = 97 + 8.98 * p3 + 0.00578 * p3^2$

O Método utilizado para solução do problema é o de Newton-Raphson que tem base na Equação (2):

$$p_{n+1} = p_n - \frac{F(p_n)}{F'(p_n)} \quad (2)$$

Onde os valores iniciais para $p1, p2, p3\ e\ l$, são calculados com referência no fator de participação, para prever os valores e com isso ter uma convergência mais rápida. Na Equação (3) é mostrada a expressão para executar esse cálculo com base no valor de participação da unidade 1.

$$\frac{\frac{1}{\frac{\partial^2 F_1}{\partial p1^2}}}{\sum_1^n \frac{1}{\frac{\partial^2 F_i}{\partial pi^2}}} \quad (3)$$

Por exemplo, para o primeiro caso o Fator de participação é calculado pela Equação (4):

$$\frac{\frac{1}{0.00428}}{\frac{1}{0.00428} + \frac{1}{0.0018} + \frac{1}{0.01156}} = 0.2668 = p1 \quad (4)$$

Esse resultado (0.2688) também pode ser representado em porcentagem (26.68%).

Fator de participação $p2$: 0.6344 = 63.44%

Fator de participação $p3$: 0.0988 = 9.88%

Carga a ser atendida 938 MW, basta multiplicar pelos respectivos fatores de participação, lambida foi arbitrado valor inicial. Na Tabela 2 são mostrados os valores do fator de participação de todos os valores:

Tabela 2 – Valores dos Fatores de Participação

$p1 = 226.3394\, MW$
$p2 = 100.4598\, MW$
$p3 = 611.2008\, MW$
$l = 9.2$

A Figura 1 demonstra a criação e inicialização das variáveis da implementação desenvolvida.

```
i=1;
erro1 = 10;
erro2 = 10;
erro3 = 10;
p11 = 0;
p22 = 0;
p33 = 0;
p1 = 226.3394;
p2 = 100.4598;
p3 = 611.2008;
px1 = 1;
px2 = 1;
px3 = 1;
d =0;
Resposta =0;
l =9.2;
l1=0;
custo_total=0;
```

Figura 1 – Parte 1 do script da implementação computacional.

Na Figura 2 é mostrada a continuação do script, colocando o número de interações que será pedido para o programa fazer, como o erro é a diferença de uma iteração para outra, o mesmo ficou menor que a tolerância de 1MW na quarta operação, por isto foi adotado esta quantidade. Depois são colocados os valores dos Fatores de Participação de $p1, p2, p3\ e\ l$.

```
for i=1 : 4
          if (i == 1)
             p1 = 226.3394;
             p2 = 100.4598;
             p3 = 611.2008;
             l=9.2;

          else
             p1 = p11;
             p2 = p22;
             p3 = p33;
             l=l1;

          end
```

Figura 2 – Parte 2 do script da implementação computacional.

Na Figura 3 são colocadas as derivadas das funções $p1, p2\ e\ p3$ e as demais funções que possibilitam a resolução do problema pelo Método de Newton-Rhapson conforme a Equação 2.

```
px1 = 0.00418*p1 + 9.13;
px2 = 0.0019*p2 + 6.27;
px3 = 0.01156*p3 + 8.98;
px4 = -p1-p2-p3+938+0.000009*(p1)^2+0.0001*(p2)^2+0.0002*(p3)^2;
d = [p1;p2;p3;0];

a14 = -1 +(0.000018*p1);
a24 = -1 +(0.0002*p2);
a34 = -1 +(0.0004*p3);

a = [0.00428+0.000018*1 0 0 a14; 0 0.0019+0.0002*1 0 a24; 0 0
0.01156+0.0004*1 a34; 0.000018*p1-1 0.0002*p2-1 0.0004*p3-1 0];
c = [px1; px2; px3; px4];

b = -a\c;

disp('iteração')
display (i)
disp('p1, p2, p3 e lambida')

Resposta = d+b

p11 = Resposta(1,1);
p22 = Resposta(2,1);
p33 = Resposta(3,1);
l1 =Resposta(4,1);

erro1 = abs(p11 - p1)
erro2 = abs(p22 - p2)
erro3 = abs(p33 - p3)
```

Figura 3 – Parte 3 do script da implementação computacional.

Na primeira interação que a função tiver convergência, isto é, com erro menor que 1 MW que estará dentro da tolerância do Método, o programa calculará os custo total e as perdas por transmissão, conforme mostra a Figura 4.

```
if (i==4)
    custo_total=
997+9.13*p1+0.00214*p1^2+6.27*p2+0.00095*p2^2+8.98*p3+0.00578*p3^2;

    Custo_Total= sprintf('%0.5f', custo_total)
    Perdas_Totais = 0.000009*p1^2+0.0001*p2^2+0.0002*p3^2
end
i=i+1;
end
```

Figura 4 – Parte 4 do script da implementação computacional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 são mostrados os resultados de cada interação. Nas interação 1, 2 e 3 foram calculados os valores de $p1, p2, p3\ e\ l$, mas os erros foram maiores que 1 MW, por isso foram feitas 4 interações até que todos os erros fossem menores que 1. Conforme pode ser observado na interação 4, os erros estão dentro da tolerância (menores que 1), mas o valor de $p3$ fico abaixo do limite mínimo pedido pelo problema que é de 50 MW e no resultado gerado na interação foi de 39.5065 MW.

```
Iteração i = 1
p1, p2, p3 e lambida
Resposta = 47.8928  815.0652  20.4229  9.3208
erro1 =  178.4466  erro2 =  714.6054  erro3 =  590.7779

iteração i = 2
p1, p2, p3 e lambida
Resposta = 104.0722  869.9737  39.6476  9.5883
erro1 = 56.1794  erro2 = 54.9085  erro3 = 19.2248

iteração i = 3
p1, p2, p3 e lambida
Resposta = 105.2598  869.1912  39.5102  9.5883
erro1 = 1.1876  erro2 = 0.7825  erro3 = 0.1374

iteração i = 4
p1, p2, p3 e lambida
Resposta = 105.2737  869.1788  39.5065  9.5882
erro1 = 0.0139  erro2 = 0.0123  erro3 = 0.0036
Custo_Total = 8513.10422
Perdas_Totais =  75.9613
```

Figura 5 – Resultados de cada interação.

Por causa dessa potência que ficou fora dos limites, a parte 3 do script deve ser modificada para limitar o valor de $p3$, como pode ser visto na Figura 6.

```
if p33<50
    p33=50;
    px1 = 0.00418*p1 + 9.13;
    px2 = 0.0019*p2 + 6.27;
    px4 = -p1-p2+908+0.000009*(p1)^2+0.0001*(p2)^2;
    d = [p1;p2;0];
    a14 = -1 +(0.000018*p1);
    a24 = -1 +(0.0002*p2);
    a = [0.00428+0.000018*l 0 a14; 0 0.0019+0.0002*l a24; 0.000018*p1-1
0.0002*p2-1  0];
    c = [px1; px2; px4];
    b = -a\c;
    disp('iteração')
    display (i)
    disp('p1, p2, p3 e lambida')
    Resposta = d+b;
    p11=Resposta(1,1)
    p22 =Resposta(2,1)
    p33=50
end
```

Figura 6 – Parte 3 modificada do script da implementação computacional.

Após limitar o valor, foram feitas as novas interações e gerados os resultados finais do custo total e das perdas totais por transmissão são mostrados na Figura 7.

```
Iteração i = 1
p1, p2, p3
Resposta = 75.9712  847.9041  50

iteração i = 2
p1, p2, p3
Resposta = 109.8912   874.6341  50

iteração i = 3
p1, p2, p3
Resposta = 110.4444  874.0642 50

Iteração i = 4
p1, p2, p3
Resposta = 110.4496  874.0579  50
Custo_Total = 8701.08207
Perdas_Totais = 77.0086
```

Figura 7 – Resultados finais de custo total e de perdas.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi apresentada a implementação computacional para determinar os custos totais e as perdas totais por transmissão de uma termoelétrica através de programação no software MATLAB®. Na implementação foi utilizado o Método de Newton-Rapson, que é considerado por alguns especialistas como o melhor Método para o tipo de problema proposto no trabalho. E nesse trabalho, foi possível observar também, a fácil convergência do Método mesmo com poucas interações.

A implementação viabilizou que fosse feita uma simulação para uma termoelétrica considerando as funções de custo, a função de perdas de transmissão e os limites de potências mínimas e máximas. Após fazer as interações até chegar no erro dentro da tolerência, notou-se que nem sempre os valores de potências ficam dentro dos limites, necessitando de uma adaptação na implementação para limitar os valores que ficaram fora dos máximos e míminos de potências previstos. E que após fazer essa adaptação, os valores ficaram dentro do limite podendo assim calcular o custo final e as perdas totais de potência na transmissão.

REFERÊNCIAS

BORGES, C. L. T. Análise de sistemas de potência. Rio de Janeiro: EE-UFRJ, Departamento de Eletrotécnica, 2005.

BORGES, S. S. Pré despacho de potência ativa e reativa para sistemas hidrotérmicos utilizando método de pontos interiores e coordenadas retangulares. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2010.

COELHO, L. D. S.; MARIANI, V. C. Evolução diferencial híbrida com programação quadrática aplicada ao problema de despacho econômico de energia elétrica. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, 17(4), 409-423, 2006.

DOS SANTOS, E. F. Um modelo de pré-despacho de usinas hidrelétricas usando algoritmos genéticos. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

LOPES, J. E. G. Modelo de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de produção de energia elétrica. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2007.

LUCIANO, E. J. R. Um modelo de unit commitment hidrotérmico para o ambiente de mercados de energia. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2010.

OLIVEIRA, M. P. A indústria elétrica no Brasil no início do século XX: a companhia brasileira de energia elétrica e a atuação do grupo guinle & cia na produção do urbano e suas redes técnicas. Departamento de Geografia – Universidade Federal Flminense, 2012.

PALM, W. J. Introdução ao MATLAB para engenheiros. 3ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ROMANI, M. Impactos da geração distribuída na estabilidade a grandes perturbações em sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2014.

SOUZA, M. A. D. S. Investigação e aplicação de métodos primal-dual pontos interiores em problemas de despacho econômico e ambiental. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2010.

WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. Power generation, operation, and control. John Wiley & Sons, 2012.