



Instituto Superior de Engenharia do Porto

Despacho Óptimo em Sistemas Eléctricos de Energia Isolados

Dissertação elaborada por Pedro Maia, aluno número 1030429, sob a orientação dos professores José António Beleza Carvalho e Manuel João Gonçalves, inserida no curso de Mestrado Integrado em Sistemas Eléctricos de Energia.

Porto, Novembro de 2010

RESUMO

A gestão dos sistemas eléctricos de energia assume um papel fundamental a vários níveis. Desde logo, o bom funcionamento (qualidade e continuidade de serviço) e a segurança da exploração apenas são conseguidos com um bom planeamento. Outro ponto importantíssimo é o aspecto económico. A este nível, os sistemas eléctricos representam um peso importante nas economias nacionais, uma vez que a energia é o motor do desenvolvimento. Nos tempos que correm, o aparecimento de grandes potências tem agitado os mercados energéticos, fazendo com que o preço dos produtos energéticos atinja máximos históricos.

No primeiro capítulo deste trabalho, é feita uma introdução onde se apresenta e contextualiza o Despacho Ótimo na gestão global dos sistemas eléctricos de energia e como estes evoluíram nos últimos anos.

O problema do Despacho Ótimo e todas as condicionantes/variáveis inerentes à sua resolução são aprofundados no capítulo 2. Primeiramente desprezando as perdas de transmissão das linhas, e depois com a sua contemplação. É, também, apresentado o métodos dos multiplicadores de Lagrange aplicado a este problema.

No capítulo 3 é feita uma resenha da evolução dos métodos utilizados para a resolução do Despacho Ótimo, fazendo-se a distinção entre os métodos clássicos e os mais recentes métodos heurísticos. A evolução que se tem verificado ao longo dos anos nos métodos utilizados, assim como o recurso ao cálculo computacional, devem-se à crescente complexidade dos Sistemas Eléctricos e à necessidade de rapidez e precisão nos resultados.

Devido ao facto das centrais de produção de energia eléctrica funcionarem, não só com recurso a matérias-primas mas também através de recursos naturais que não têm um

custo de aquisição, mas que não têm uma disponibilidade constante, existe a necessidade de se fazer uma gestão criteriosa na conjugação dos diversos tipos de produção.

Como no nosso país a grande alternativa às centrais térmicas são as hídricas, no capítulo 4 é apresentado o problema da coordenação hidro-térmica.

No capítulo 5 é exposta a ferramenta computacional desenvolvida para a resolução do despacho ótimo com e sem perdas, que consiste num programa elaborado com o “*software MatLab*”.

Este trabalho finaliza com um capítulo de conclusões.

ÍNDICE GERAL:

Resumo	2
Índice Geral	4
1- Introdução	6
2- Formulação do problema do despacho óptimo	12
2.1- Custos de Produção	13
2.2- Despacho sem Perdas	16
2.3- Despacho com Perdas	17
2.3.1- Determinação da Equação das Perdas de Transmissão PL	18
2.3.1.1- Construção da Matriz C	25
2.4- Aplicação do Método dos Multiplicadores de Lagrange	28
2.4.1- Despacho sem Perdas	28
2.4.2- Despacho com Perdas	31
2.4.2.1- Algoritmo de Resolução	33
3- Métodos Computacionais no Problema do Despacho Óptimo	37
3.1- Algoritmos Genéticos	41
3.1.1- Representação dos Indivíduos	42
3.1.2- População Inicial	43
3.1.3- Função Aptidão	43
3.1.4- Métodos de Selecção	43
3.1.5- Operadores Genéticos	44
3.1.5.1- Operador de Cruzamento	45
3.1.5.2- Operador de Mutação	45
3.1.6- Critério de Paragem	45
3.2- Redes Neurais (<i>Hopfield Modeling</i>)	46
3.2.1 – Algoritmo	48
3.3- Optimização do Enxame (<i>Particle Swarm Optimization</i>)	50
3.4- Tabu Search Algoritm	51
3.4.1- Algoritmo	52

4- Despacho Ótimo e Coordenação Hidro-Térmica	54
4.1- Introdução	55
4.2- Formulação do Problema	57
5- Desenvolvimento de uma Metodologia para Efectuar o Despacho Ótimo em SEE	61
5.1- Ferramenta Computacional	62
5.1.1- Estrutura da Aplicação	62
5.2- Validação dos Resultados	65
5.2.1- Resultados Obtidos com a Ferramenta Computacional	66
5.2.2- Análise dos Resultados	67
5.3- Exemplo de Aplicação	68
6- Conclusão	74
Índice de Figuras	76
Índice de Tabelas	76
Índice de Gráficos	76
Referências Bibliográficas	77
Anexos	84

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1- INTRODUÇÃO

A energia representa uma fracção bastante relevante na economia de um país/região, facto pelo qual se torna fulcral que esta seja gerida da melhor forma possível. Entenda-se como gestão da energia, o planeamento e exploração de todo o sistema eléctrico, de modo a que o consumo seja satisfeito com menor custo possível.

No âmbito da exploração, ao longo dos últimos anos, têm-se desenvolvido métodos cada vez mais elaborados, que conduzem a resultados mais eficientes. Estes avanços foram possíveis graças à evolução da tecnologia, em especial das comunicações.

A possibilidade de ter em tempo real, diversa informação sobre o estado do sistema, permite fazer uma análise do que está a ocorrer e, se necessário, actuar na rede em conformidade.

O Despacho Óptimo é um dos procedimentos que se efectuam nos sistemas eléctricos de energia, cuja finalidade é repartir a carga pelos geradores que se encontram em funcionamento, de modo a que os custos de exploração sejam mínimos. Os métodos utilizados têm evoluído ao longo dos tempos, como se irá explicar no decorrer deste trabalho.

No entanto, é importante frisar que os métodos que aqui serão explanados são utilizados quando estamos num contexto de sistema eléctrico isolado clássico, não nos novos contextos de mercado liberalizado.

No contexto tradicional/clássico, o Sistema Eléctrico de Energia é representado por um monopólio estatal verticalmente integrado, como representa a figura 1. Deste modo, a empresa detentora do monopólio possui toda a responsabilidade do planeamento e operação do sistema, tratando-se portanto, de um planeamento centralizado [1].

O modelo tarifário é elaborado com base nos custos dos serviços e dos investimentos realizados. Sendo que, deste modo, as empresas verticalmente integradas asseguram remunerações que permitem recuperar todos os seus custos [2].



Fig.1 – Estrutura do sector eléctrico verticalmente integrada [2]

Neste contexto, os Sistema Eléctricos são geridos em função de três horizontes temporais: a longo, médio e curto prazo.

É através do planeamento de longo prazo que se tomam decisões relativas a investimentos em novos centros de produção e/ou na expansão da rede eléctrica. Considerando um horizonte temporal que poderá variar entre os 2-3 anos até aos 10-15 anos ou mais, estes estudos têm como base, previsões de crescimento do consumo, as diversas alternativas tecnológicas e ainda as previsões da evolução da disponibilidade e custos dos combustíveis [3].

Reduzindo o horizonte temporal para cerca de 1-3 anos (planeamento a médio prazo), torna-se necessário tomar decisões no que concerne à aquisição de combustíveis e às acções de manutenção nas centrais produtoras e na rede.

As centrais de produção de energia eléctrica, têm que ser submetidas a acções de manutenção periódicas, de modo a reduzir o risco de avarias e a aumentar a sua eficiência. A periodicidade destas manutenções depende de central para central.

No que respeita à rede, actualmente já existem técnicas e tecnologias, que permitem efectuar diversos trabalhos em tensão, ou seja, sem necessidade de colocar linhas fora de serviço. No entanto, certas operações de manutenção têm mesmo que ser efectuadas recorrendo à colocação fora de serviço desse elemento, por razões de segurança.

Como é fácil de depreender, um bom planeamento dos ciclos de manutenção das centrais e da rede, permite otimizar recursos e minorar os constrangimentos causados por estas acções.

Outra função do planeamento a médio prazo, é gerir o combustível necessário ao funcionamento das centrais. Esta função contempla toda uma política de aquisição de combustíveis e de armazenamento, de modo a que não ocorram problemas de abastecimento [3].

A complexidade desta tarefa prende-se com o facto da existência de diversas tecnologias de produção e das oscilações que se verificam nos preços dos combustíveis. É necessário gerir a compra de carvão, gás e petróleo, para além de que se tem que ter em consideração às centrais hidroeléctricas.

O combustível das centrais hidroeléctricas, apesar de ser gratuito, tem que ser gerido de forma a ser retirado o máximo proveito dele. As centrais de albufeira permitem uma melhor gestão da água, que em certas alturas do ano, ou em certos anos, pode escassear. Esta gestão irá definir o uso de determinada central no tempo. É importante referir que, também têm que ser ponderados os impactos ambientais.

É no planeamento de curto prazo, no espaço de dias a um mês, que se tomam decisões sobre quais as centrais que irão estar em funcionamento (problema conhecido por Unit

Commitment). As decisões são tomadas com base na carga estimada para o período em questão, custos de funcionamento, custos de arranque e reserva girante.

Muito embora o custo de produção seja bastante importante, pode não ser um factor determinante. No caso das centrais térmicas, por exemplo, poderão pesar mais os custos de arranque da central. Devido a estes custos significativos e ao tempo de arranque que também, por regra, é elevado, por vezes é mais vantajoso manter estas centrais sempre em serviço, mesmo que em limites mínimos.

Outro factor a ser avaliado é a reserva girante [4], que consiste na capacidade das centrais que estão em funcionamento, serem capazes de suportar a saída de serviço de algum grupo gerador, motivada por uma avaria e variações imprevistas no consumo. Esta reserva será tanto maior quanto o nível de segurança que se pretende.

É também no planeamento de curto prazo, que após a decisão de quais as centrais que estarão em funcionamento, se determina o que cada central irá produzir de modo a que os custos de produção sejam mínimos. Este é o chamado problema do **Despacho Ótimo**, que é o tema central deste trabalho.

Contudo, nos últimos anos, tem-se assistido à liberalização dos mercados, isto é, ao final dos monopólios estatais e à garantia de igualdade de condições para todos os que desejam ser parte activa nos Sistemas Eléctricos.

O processo de liberalização passa, obrigatoriamente, pela separação de actividades. Usualmente o sector é dividido em subsectores como a produção, transporte e distribuição. Estas actividades serão representadas por empresas que concorrem entre si, cabendo a elas gerir o risco da sua actividade. As decisões de cada empresa são baseadas essencialmente no risco económico e nas expectativas de benefícios que estas poderão obter.

A criação das regras do mercado é elaborada por uma entidade reguladora, para que se atinjam os objectivos propostos.

Verifica-se também, a necessidade de um operador que zele pela segurança e fiabilidade do sistema. Cabe a este operador centralizado analisar a viabilidade técnica em tempo real do sistema. Esta função, em Portugal, é desempenhada pela “Redes Energéticas Nacionais”.

Desta forma, o principal objectivo, do ponto de vista económico, deixa de ser minimizar o custo global do sistema (embora haja tendência para que isso aconteça), mas cada entidade envolvida irá tentar maximizar o seu lucro.

Acredita-se que a concorrência criada por este modelo aumentará a eficiência deste sector, conduzindo assim à redução do preço final da energia eléctrica [2].

Capítulo 2

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DO DESPACHO ÓPTIMO

2- FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DO DESPACHO ÓPTIMO

Para que a exploração de um sistema eléctrico de energia seja feita do modo mais económico possível, é necessário que sejam adoptados métodos que determinem criteriosamente as centrais que estarão em funcionamento e quanto irão produzir. Esta escolha tem que ser feita pois os custos de produção variam de central para central, assim como a capacidade de produção de cada uma.

À escolha das centrais que estarão em funcionamento num dado período, dá-se o nome de Unit-Commitment. Esta escolha pode ser feita segundo diversas metodologias, entre as quais a ordem de mérito, a programação dinâmica e a relaxação lagrangeana. Estas metodologias não são exploradas aqui por não serem o objecto de estudo deste trabalho, no entanto, existe bibliografia [1] [3] onde estão bem apresentadas.

Após efectuado o "Unit commitment", torna-se necessário definir quanto é que vai produzir cada um, de modo a que o custo total de produção seja o mais baixo possível. A este problema dá-se o nome de Despacho Económico.

2.1 – CUSTOS DE PRODUÇÃO

Considerando as centrais térmicas como sendo aquelas que mais influenciam os custos de produção de energia no sistema eléctrico, os custos de produção associados a estas centrais podem ser divididos em três parcelas:

- Custo de capital
- Custos de operação e manutenção
- Custos de combustíveis

Contudo, no intuito de se analisar os custos de funcionamento do sistema, são considerados apenas os custos de combustível, devido ao peso que estes têm em relação aos restantes [5].

Para que o sistema eléctrico possa funcionar de uma forma económica, é necessário que se conheçam as características dos grupos geradores com a máxima exactidão possível.

Um grupo térmico de produção de energia eléctrica pode ser representado, de uma forma simplificada, pelo seguinte esquema:

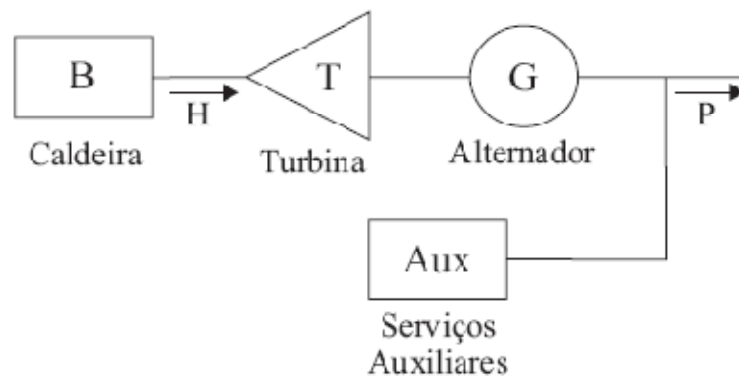


Fig.2 - Esquema de um grupo térmico com caldeira, turbina e alternador [5]

A parte representada no esquema, referente aos serviços auxiliares, compreende as bombas de circulação da caldeira, ventoinhas de arrefecimento, bombas de circulação de água do condensador, entre outros. Estes serviços têm um consumo que poderá rondar os 2% a 6% da produção total do grupo [5]. O diferencial entre a potência total produzida pelo grupo e a consumida pelos serviços auxiliares, representa a potência que é entregue à rede de energia eléctrica (P).

A característica essencial, para efeitos de estudos económicos, dos grupos geradores, consiste na relação entre a potência térmica à entrada da turbina (H), resultante da queima do combustível, e a potência eléctrica à saída do grupo (P) [2]. Através de ensaios experimentais para diferentes regimes de carga, é possível construir um gráfico onde esta relação é traduzida por uma curva, habitualmente aproximada por uma função polinomial

do segundo grau. Multiplicando essa função pelo custo do combustível, obtemos a função custo de produção para um grupo gerador térmico, como sugere a equação 1.

—

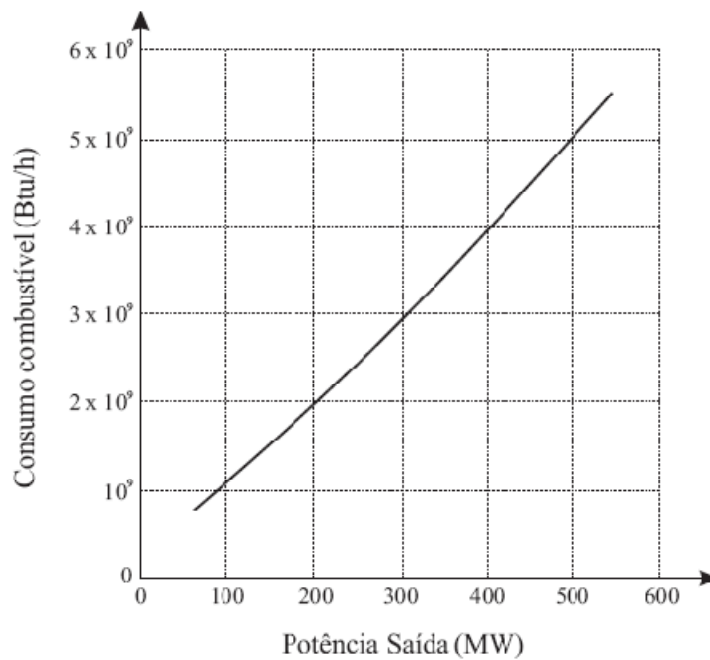
(Eq.1)

Onde:

f - Custos de produção [€/h]

P - Potência eléctrica entregue à rede [MW]

a, b, c - Parâmetros característicos do grupo



Gráf.1 – Curva típica do consumo de combustível em função da potência eléctrica de saída [2]

Analisando o gráfico, pode-se constatar que o consumo de combustível em vazio, neste tipo de centrais, não é nulo e que o gerador não deve funcionar a baixo nem acima de um determinado valor.

Verifica-se também, como já foi referido, que esta curva não é linear, uma vez que o consumo específico de combustível não é constante, variando com a potência.

2.2 – DESPACHO ÓPTIMO SEM PERDAS

A resolução do problema do despacho pode ser feita sobre dois prismas: sem consideração de perdas e com consideração destas.

Para a primeira situação, temos que o custo de produção global de um sistema é dado por f :

(Eq.2)

Onde f_i representa o custo da energia produzida pelos geradores ligados ao barramento i , em €/h.

Este custo é afectado principalmente pela potência activa gerada (P_{gi}), pelo que desprezamos a influência da potência reactiva. Isto deve-se ao facto de estas serem controladas pelas correntes de campo, o que não exige um maior consumo de combustível.

Sendo assim, o custo individual de produção, da central i , é função apenas de P_{gi} , então pode-se dizer que:

(Eq.3)

Ficando a equação 3:

(Eq.4)

O problema consiste então em determinar o conjunto de valores para P_{gi} que torne o custo de produção mínimo - designado por função de custo ou função objectivo. O conjunto de valores encontrados deverá satisfazer uma série de restrições de igualdade relacionadas com o balanço energético da rede, que é dada por:

(Eq.5)

Onde P_c é a potência da carga.

2.3 – DESPACHO ÓPTIMO COM PERDAS

A produção num sistema eléctrico de energia é normalmente feita longe dos grandes centros de consumo. É necessário então fazer o transporte da energia produzida das centrais para os centros de consumo. Estas grandes distâncias provocam perdas de energia, designadas por perdas de transmissão, que em alguns casos podem atingir os 20 ou 30% da carga total [6]. Sendo assim é necessário ter esta situação em conta quando se pretende estabelecer uma estratégia para o despacho.

Como se verificou anteriormente, a função custo de produção global (f), é dado por:

(Eq.6)

Assim como, a potência total de saída produzida é dada pelo somatório de todas as potências produzidas em cada um dos geradores existentes:

(Eq.7)

Considerando agora as perdas de transmissão, a equação que traduz o balanço energético será:

(Eq.8)

Onde PL representa as perdas de transmissão nas linhas e PD o somatório de todas as potências de carga. Tal como no despacho ótimo sem perdas, o objectivo passa por minimizar f , para uma determinada carga, satisfazendo a restrição imposta pela equação do balanço energético.

2.3.1 – DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO DAS PERDAS DE TRANSMISSÃO PL

A determinação da equação das perdas de transmissão pode ser efectuada através de diversas metodologias. Neste trabalho, as perdas serão calculadas em função das potências de cada unidade de produção, como sugere Grainger e Steveson em “*Power System Analysis*”.

Para mais fácil se descrever o método utilizado, vai-se adoptar um sistema composto por duas centrais de produção e duas cargas, interligados por uma rede representada pela sua matriz das impedâncias [7].

Considere-se então o sistema representado na figura 2 a), onde os barramentos 1 e 2 são de produção e os barramentos 3 e 4 são de consumo. O nó N é o neutro do sistema. Nesta primeira fase vamos trabalhar apenas com um elemento em cada barramento. Para situações em que temos no mesmo barramento produção e consumo, tal como está representado na figura 2 c), explicaremos mais à frente neste capítulo como resolver.

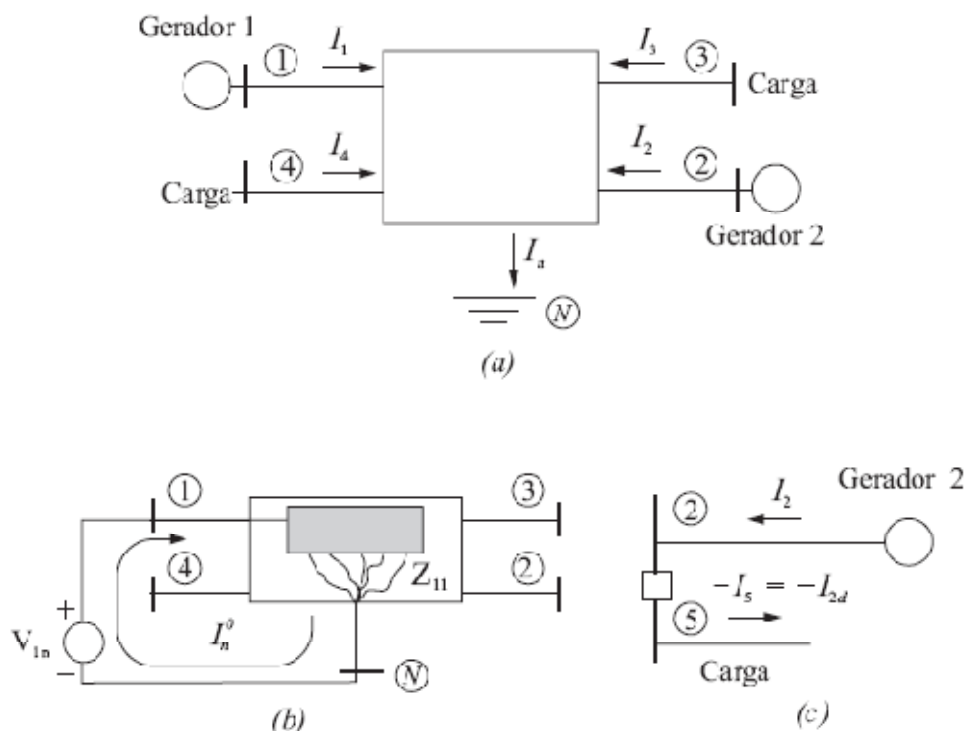


Fig.2 [7] – a) Sistema eléctrico composto por quatro barramentos
 b) Interpretação da “corrente sem carga” , usada na Eq.15
 c) Situação em que o barramento possui produção e consumo

Retomando exemplo representado na figura 2 a), as correntes injectadas, I_{i1} e I_{i2} , nos barramentos de consumo podem ser combinadas numa corrente de carga I_c , como sugerido na seguinte equação:

(Eq.9)

Assumindo que cada corrente é uma fracção constante da corrente de carga I_c , pode dizer-se que:

(Eq.10)

Sendo que:

(Eq.11)

Considerando o nó N como nó de referência, as equações nodais sobre a forma de matriz serão:

(Eq.12)

Expandindo a primeira linha, obtém-se:

(Eq.13)

Aplicando a equação 11 e resolvendo em ordem à corrente de carga I_c , temos:

_____ (Eq.14)

Onde a corrente i_N , designada por “corrente sem carga”, é uma corrente constante injectada no nó N sempre que a tensão V_N é constante.

$$i_N = \dots \quad (\text{Eq.15})$$

Para simplificar a expressão 14, pode-se escrever que:

$$\dots \quad (\text{Eq.16})$$

Ficando a expressão simplificada com o seguinte formato:

$$\dots \quad (\text{Eq.17})$$

Substituindo agora a equação anterior na equação 10, obtém-se:

$$\dots \quad (\text{Eq.18})$$

$$\dots \quad (\text{Eq.19})$$

Através das equações 18 e 19, pode definir-se a matriz de transformação C, com a qual se pode passar das correntes “velhas” i_1, i_2, i_3 para as “novas” correntes i_1', i_2', i_3' :

$$\dots \quad (\text{Eq.20})$$

A matriz C não será alvo de uma explicação muito aprofundada neste trabalho. No entanto, existe bibliografia [7] onde se encontra muito bem apresentada.

Mais à frente, explicar-se-á o aparecimento da matriz de transformação C e dar-se-á uma interpretação física da mesma.

A partir da equação 20, pode-se definir a expressão das perdas de transmissão :

(Eq.21)

Para explicar o facto da corrente I_0 ser designada por “corrente sem carga”, considere-se o esquema representado na figura 2 b).

Se se removerem todos os geradores e cargas do sistema e se aplicar a tensão V_0 ao barramento 1, apenas a corrente I_0 irá circular pelas ligações *shunt* feitas ao nó N . Normalmente, esta corrente é pequena e constante, visto ser determinada pela impedância de *Thevenin* Z_{th} , que inclui as impedâncias associadas às correntes de magnetização dos transformadores, mas sem a presença de qualquer carga.

Assumindo que a potência reactiva Q , em cada barramento de geração, é uma fracção constante k da potência activa P , para um determinado período de tempo, isto significa assumir que cada gerador funciona com um factor de potência constante. Logo, temos para cada gerador:

(Eq.22)

Onde:

— — (Eq.23)

Pode-se também definir as correntes de geração como sendo:

$$\underline{I}_g = \underline{I}_g \quad (Eq.24)$$

As correntes \underline{I}_g e \underline{I}_l podem ser expressas sobre a forma de matriz:

$$\underline{I}_g = \underline{I}_g \quad (Eq.25)$$

Substituindo a equação 25 na 21, obtém-se:

$$\underline{I}_g = \underline{I}_g \quad (Eq.26)$$

De modo a simplificar a expressão pode definir-se como:

$$\underline{I}_g = \underline{I}_g \quad (Eq.27)$$

Através da matriz \underline{B} pode obter-se a matriz dos coeficientes B, recorrendo à seguinte expressão:

$$\underline{B} = \underline{B} \quad (Eq.28)$$

Aplicando a matriz dos coeficiente B à equação 26, vem que:

(Eq.29)

Expandindo a equação anterior e sabendo que \dots é igual a \dots , vem:

(Eq.30)

Sob a forma matricial, obtém-se:

(Eq.31)

Ou:

(Eq.32)

Generalizando para n geradores, obtém-se a equação geral das perdas de transmissão:

(Eq.33)

Tal como foi referido anteriormente, na situação em que no mesmo barramento existe produção e carga, a determinação das perdas de transmissão sofre algumas alterações.

Consideremos que a carga representada na figura 2 c) tem uma corrente igual a I_c . Como as correntes são tratadas como correntes injectadas nos barramentos, torna-se necessário criar um barramento fictício, que neste exemplo é o barramento 5, com uma corrente injectada igual a I_c . Sendo assim, a matriz das impedâncias Z , tem de ser expandida em uma linha e uma coluna, correspondente à inserção de um novo barramento.

A nova linha e coluna serão iguais à linha e coluna da matriz das impedâncias com o índice do barramento ao qual a carga se encontra associada. O elemento da diagonal principal será, neste exemplo, igual ao elemento Z_{55} .

A partir deste momento, procede-se com o método já explicado, considerando agora um novo barramento de carga.

2.3.1.1 – COSTRUÇÃO DA MATRIZ C

Neste ponto, apresenta-se uma pequena explicação do significado da matriz C [7], usada na determinação da expressão das perdas de transmissão.

Esta matriz é a combinação de duas transformações usadas na obtenção do vector das correntes “velhas” através do vector das correntes “novas”.

A primeira transformação, T_1 , relaciona as correntes individuais de carga com a corrente total de carga I_c , como se pode ver na seguinte equação:

(Eq.34)

Sendo

(Eq.35)

Esta matriz representa o conceito “centro de carga do sistema”, sendo que a corrente I_D é injectada no nó fictício D, como o indicado na figura 3 b). A corrente I_C representa a soma de todas as correntes de carga injectadas nos barramentos. Por sua vez, os elementos relacionam a corrente I_D com a corrente I_C .

A segunda transformação, T_2 , transforma a corrente I_C numa corrente independente, sendo esta substituída pela “corrente sem carga” I_{SC} , como se indica na equação 36.

(Eq.36)

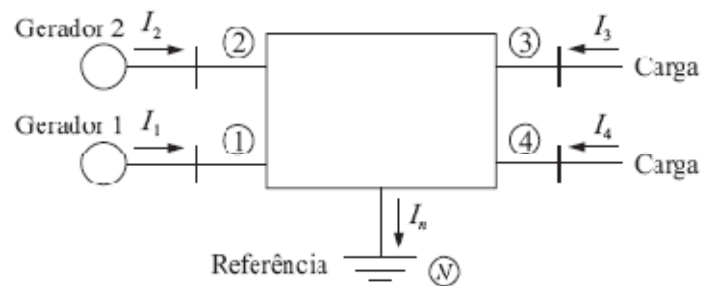
E

(Eq.37)

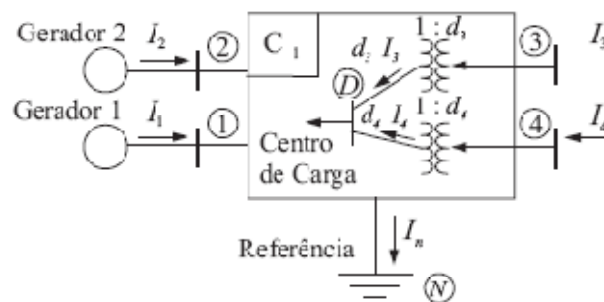
Da combinação de T_1 com T_2 resulta a matriz de Transformação C, como representado na seguinte equação:

(Eq.38)

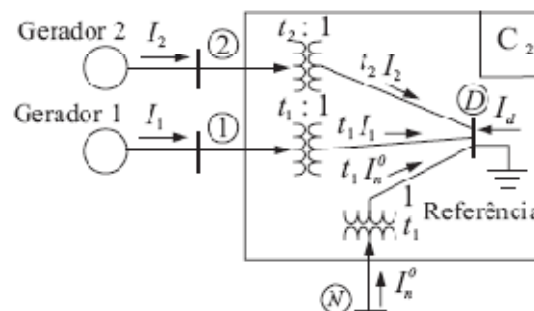
Para a resolução do problema do Despacho Ótimo, a informação que aqui se disponibiliza sobre a matriz C é suficiente. No entanto, é possível obter informação mais detalhada recorrendo a bibliografia recomendada, nomeadamente na referência [7].



(a)



(b)



(c)

Fig.3 [7] – a) Sistema eléctrico composto por quatro barramentos;
 b) Conceito de centro de carga do sistema;
 c) Mudança do barramento de referência do nó N para o nó D.

2.4- APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

2.4.1- DESPACHO SEM PERDAS

Após a formulação do problema do Despacho Ótimo Sem Perdas, composto pela equação 4 e condicionado pela equação do balanço energético (Eq.5), estamos na presença de um problema de optimização condicionado que pode ser resolvido recorrendo ao Método dos Multiplicadores de Lagrange.

A função de custo aumentada ou Lagrangeano pode ser definida como:

(Eq.39)

Onde λ é designado por multiplicador de Lagrange.

Para se obter o óptimo, igualam-se a zero as derivadas parciais do Lagrangeano em ordem às variáveis independentes P_i , resultando:

(Eq.40)

Calculando as derivadas e agrupando as equações 4 e 5, obtém-se:

(Eq.41)

A derivada $\frac{\partial C_i}{\partial P_i}$ representa o custo marginal de produção do gerador i , isto é, o custo do aumento de uma unidade na potência gerada.

Pode então concluir-se, através da equação 41, que para a situação do Despacho Ótimo sem perdas, todos os geradores devem funcionar com custos marginais de produção iguais, ou seja:

(Eq.42)

As n equações (Eq. 41) mais a equação do balanço energético, são suficientes para calcular as $n+1$ incógnitas, relativas ao conjunto de valores de λ e ao multiplicador de Lagrange.

Para além de todas estas considerações, existe ainda mais uma restrição a considerar na resolução do problema, que são as restrições de desigualdade, que representam os limites máximo e mínimo da potência produzida em cada gerador.

(Eq.43)

Partindo destas expressões, conclui-se que quando um gerador atinge o seu limite, seja ele mínimo ou máximo, a sua potência é fixada nesse valor e os restantes geradores são operados até se atingirem a regra do Despacho Ótimo, isto é, até que os custos incrementais sejam iguais para todos os geradores.

Considere-se uma situação simples, em que temos dois geradores. Neste caso, é possível determinar analiticamente a condição de Despacho Ótimo. Sejam os custos de produção de cada central i , iguais a:

—

—

(Eq.44)

Aplicando a equação 42, vem:

(Eq.45)

Para esta situação, a equação do balanço energético é igual a:

(Eq.46)

Resolvendo o sistema representado pelas equações 57 e 58, obtém-se para custo marginal de produção:

(Eq.47)

E para as potências geradas:

(Eq.48)

Generalizando as equações anteriores para uma situação com n geradores:

(Eq.49)

E

(Eq.50)

2.4.2- DESPACHO COM PERDAS

Tal como vimos no ponto 2.3, a formulação do problema do Despacho Ótimo com perdas é um pouco mais complexo do que o sem perdas.

A consideração das perdas de transmissão, à semelhança do Despacho sem perdas, pode ser resolvida recorrendo ao método dos Multiplicadores de Lagrange.

Nesta situação, o Lagrangeano será:

(Eq.51)

O óptimo obtém-se derivando parcialmente a função F em ordem a cada uma das potências geradas individuais e igualando a zero, tal como indica a seguinte expressão:

$$\frac{\partial F}{\partial P_i} = 0 \quad (Eq.52)$$

Como o valor da carga é considerado constante e o custo de combustível em cada unidade apenas varia com a potência de saída, pode então reescrever-se a equação anterior, para cada unidade, como:

$$\frac{\partial F}{\partial P_i} = \frac{\partial F_{gen}}{\partial P_i} + \frac{\partial F_{loss}}{\partial P_i} = 0 \quad (Eq.53)$$

A derivada parcial $\frac{\partial F_{loss}}{\partial P_i}$ representa as perdas incrementais associadas ao gerador i.

Resolvendo a equação anterior em ordem a P_i , vem:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \quad (Eq.54)$$

Reescrevendo a equação de uma forma simplificada, temos:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \quad (Eq.55)$$

Onde λ_i é designado por factor de penalização da unidade i e é dado por:

$$\lambda_i = \frac{\partial L}{\partial P_i} \quad (Eq.56)$$

Daqui se conclui que para o Despacho Ótimo considerando as perdas de transmissão, o ponto ótimo se obtém quando os custos marginais de produção de cada unidade multiplicados pelo respectivo factor de penalização, são iguais para todas as unidades de produção do sistema.

Deste modo, verifica-se que o custo global de produção é dado por:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \quad (Eq.57)$$

O factor de penalização λ_i depende apenas das perdas incrementais associadas ao gerador i , que medem a sensibilidade das perdas de transmissão do sistema em relação à variação das potências geradas P_i .

Substituindo o da equação 33 na equação 8, tem-se:

(Eq.65)

A solução do Despacho Ótimo pode agora ser encontrada resolvendo as equações representadas no sistema das Eq.64, tendo em consideração a restrição do balanço energético dado pela equação 65.

A figura seguinte apresenta um algoritmo para a resolução deste problema.

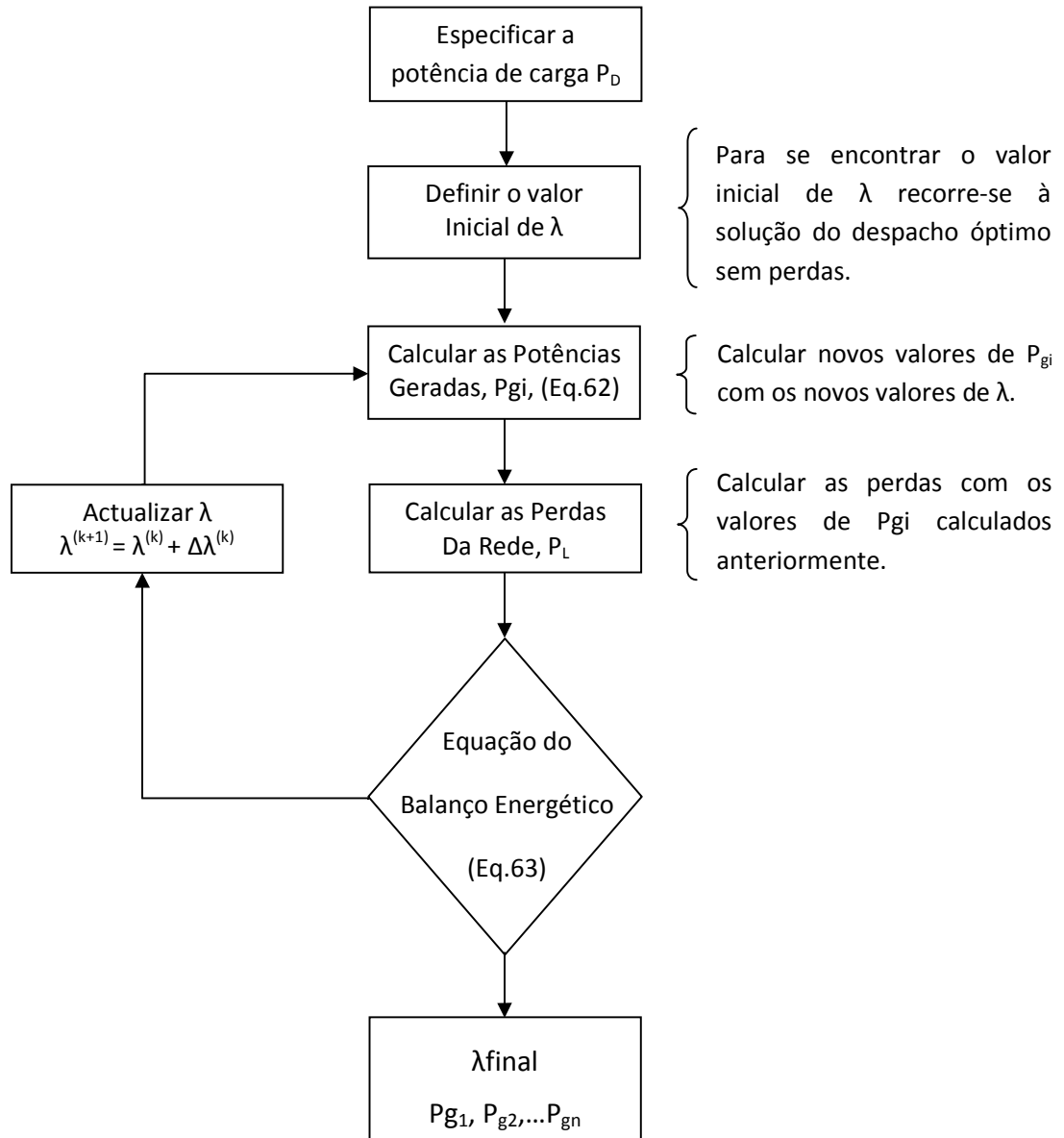


Fig.4 – Algoritmo do despacho óptimo com perdas

Capítulo 3

MÉTODOS COMPUTACIONAIS NO PROBLEMA DO DESPACHO ÓPTIMO

3- MÉTODOS COMPUTACIONAIS NO PROBLEMA DO DESPACHO ÓPTIMO

Nos primórdios dos Sistemas Eléctricos de Energia (SEE), estes eram caracterizados pela sua reduzida dimensão e complexidade. O despacho era efectuado considerando apenas a eficiência das centrais, isto é, a central mais eficiente entrava em serviço e assegurava os aumentos da carga até ao seu limite máximo de produção [8]. Quando este era atingido, entrava em funcionamento a segunda central mais eficiente e assim em diante.

Este método não garantia, no entanto, que os custos de produção globais fossem mínimos, dado que não contempla as perdas de transmissão.

O desenvolvimento dos SEE, tanto a nível da sua dimensão como da sua complexidade, criaram a necessidade de métodos cada vez mais eficientes e que conduzissem a melhores resultados económicos.

Os primeiros métodos que foram desenvolvidos, habitualmente conhecidos por métodos clássicos, assentavam em modelos matemáticos que trabalhavam sobre custos incrementais/marginais [8].

Steinberg e Smith foram dos primeiros a trabalhar com estes métodos, por volta de 1934 [9].

Dentro dos métodos clássicos, encontram-se o método lagrangeano, o método do gradiente, o método de Newton e a programação dinâmica, entre outros.

No método das iterações lambda, calcula-se a potência de saída de cada gerador, partindo dos custos incrementais de cada um [10]. No entanto, para que tal seja possível, a função custo dos geradores tem que ser do tipo quadrática ou linear, sendo que por vezes não o é.

Para resolver este tipo de problemas, pode ser utilizado o método do gradiente. Independentemente do ponto de partida, este método baseia-se no princípio de que o

mínimo de uma função pode ser encontrado com uma série de passos que nos conduzam sempre na direcção descendente [8].

Contudo, o grande problema deste método reside no facto da possibilidade de haver mínimos locais, que podem ter como resultado que a solução encontrada não seja a solução óptima, para além do tempo de convergência poder ser grande [11].

O método de Newton constituiu um avanço para a resolução do problema do despacho económico [12].

Trata-se de um método mais robusto e que necessita de um número iterações bastante inferior para convergir. Porém, é um método mais complexo a nível de cálculo [8].

No que respeita à programação dinâmica, pode dizer-se que é um método bastante flexível, permitindo a resolução de problemas não convexos e não lineares. Contudo, trata-se de um método muito exigente em termos de capacidade de memória e tempo de processamento, mesmo para problemas de dimensão não muito elevada [13].

Este problema é conhecido pela “denominada maldição da dimensionalidade associada à programação dinâmica”.

O aumento verificado nos SEE, quer a nível de dimensão como de complexidade, pôs a nu algumas limitações dos métodos clássicos/tradicionais. Estes começaram a mostrar-se pouco robustos e sobretudo pouco eficientes em certas aplicações.

A necessidade de se alcançarem resultados mais satisfatórios fez com que se desenvolvessem os chamados métodos heurísticos [14].

Nos métodos determinísticos “a solução pode ser sempre encontrada, dependendo apenas do ponto de partida”. Contudo, “o conhecimento prévio deste ponto é o grande problema destes métodos”, que no fundo, consistem em métodos matemáticos rígidos.

O desenvolvimento dos métodos heurísticos fez aparecer, entre outros, os algoritmos genéticos (AG) [9]. Este método tem como base o processo de selecção natural e evolução

das espécies. “Na analogia matemática, os indivíduos da população são os pontos de partida ou soluções iniciais”.

A utilização de factores de penalidade [15] nos AG permite transformar um problema não linear com restrições, num problema sem restrições.

Na resolução do problema do despacho económico através deste método, é necessário codificá-lo para o domínio genético. No início, esta condição era feita no modo binário, sendo que desenvolvimentos recentes apontam para a utilização de códigos (valores) reais [15]. Desta forma, o método torna-se mais eficiente e menos complexo.

Os AG são compostos por operadores básicos, como sendo a criação da população inicial, o cruzamento, a mutação e a selecção.

Este método permite trabalhar com máquinas em paralelo, conseguindo-se assim, soluções óptimas ou soluções muito próximas da óptima, em pouco tempo [16].

Paralelamente ao desenvolvimento dos algoritmos genéticos, o problema do despacho económico tem vindo a ser abordado por outros métodos heurísticos tais como o “Tabu Search Algorithm” [17], “Hopfield Neural Network” [18] e pelo [Swarm Optimization” [19].

Métodos como o “Hopfield Modeling”, têm apresentado resultados positivos no que se refere a tempos de convergência, quando comparados com métodos clássicos.

Este método tem vindo a ser referido como indicado para o despacho on-line, devido à sua eficiência e, pelo facto de que o aumento da dimensão do sistema eléctrico não alterar consideravelmente o tempo de resolução do problema [20].

Analisando agora o “Tabu Search Algorithm”, este utiliza memória para guardar informação acerca dos resultados que vão sendo obtidos e explora novas soluções.

Quando a lista está completa, os resultados que conduzem a valores piores da função objectivo (os mais antigos) são deitados fora, de modo a que os novos e melhores resultados sejam guardados.

O método denominado por “Swarm Optimization”, que assenta num modelo matemático que simula a procura de alimento de um bando de pássaros, tem sido um dos últimos passos na matéria de optimização.

Existem três aspectos fundamentais na “Swarm Optimization”, que são a inércia, a cognição e o aspecto social. São estes aspectos que governam o movimento de uma partícula, entendendo-se aqui a partícula como sendo um pássaro de um bando, por exemplo.

A capacidade cognitiva da partícula ajuda-a a lembrar-se da sua melhor posição já visitada. Por sua vez, a componente da inércia serve para simular a inércia da partícula em se mover na direcção anterior. Quanto ao aspecto social, este tem como função modelar a memória da partícula acerca da sua melhor posição entre as outras partículas. São estes três componentes que influenciam a velocidade das partículas [21].

Este método tem-se mostrado bastante robusto, fácil de implementar e eficiente.

3.1 - ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos tiveram os seus primeiros desenvolvimentos na década de 70, através de John Holland, da Universidade do Michigan, quando ele e alguns dos seus colaboradores perceberam que os mecanismos biológicos poderiam ser representados matematicamente e simulados computacionalmente [9].

Tal como já foi referido anteriormente, os AG são algoritmos de procura baseados em processos de evolução biológicos. Eles simulam a evolução de estruturas individuais (cromossomas), recorrendo a processos de selecção e a operadores genéticos, sendo os mais conhecidos a mutação e o cruzamento.

Os cromossomas devem ser entendidos como um conjunto de valores que constituem uma possível solução para o problema.

Genericamente, um AG pode ser dividido nas seguintes etapas:

- 1- Geração da população inicial de cromossomas, usualmente recorrendo a um processo aleatório;
- 2- Avaliação da população através da chamada função de aptidão, onde cada cromossoma recebe um valor que reflecte a sua qualidade para resolver o problema;
- 3- Início do processo de selecção, no qual os indivíduos mais aptos são seleccionados e os menos aptos são descartados;
- 4- Aplicação de operadores genéticos nos cromossomas seleccionados, para que a população seja modificada e assim se possam explorar outras soluções;
- 5- A criação de uma nova geração de soluções, através das alterações realizadas na etapa anterior.
- 6- Repetição dos passos de 2 a 5 até que seja encontrada uma solução satisfatória.

Seguidamente, iremos aprofundar alguns conceitos dos AG.

3.1.1 – REPRESENTAÇÃO DOS INDIVÍDUOS

Os indivíduos representam os parâmetros da função objectivo a ser optimizada. Pode dizer-se que são valores que os parâmetros da função objectivo podem assumir.

No nosso caso mais particular, a potência de 100MW produzida pela central 1 (P1), por exemplo, é um indivíduo. Já ao conjunto de valores que P1 pode assumir, assim como os valores de P2, P3, Pn, dá-se o nome de população.

A representação dos indivíduos pode ser feita de diversos modos, dependendo do tipo de problema. No caso do Despacho Ótimo, tal como foi referido, existem dois tipos de representação: binária e real.

A representação binária é utilizada em problemas inteiros e numéricos, sendo que a representação real também pode ser aplicada a estes problemas e com as vantagens já enumeradas.

3.1.2 – POPULAÇÃO INICIAL

A geração da população inicial de um AG é, na maioria das vezes, efectuada de uma forma aleatória. É com esta população inicial que se iniciam todas as restantes etapas de um AG.

3.1.3 – FUNÇÃO APTIDÃO

A função aptidão tem como finalidade medir a qualidade das soluções. Trata-se de uma função matemática que visa verificar se determinado indivíduo representa uma possível solução para o problema que está a ser resolvido.

3.1.4 – MÉTODOS DE SELECÇÃO

Ao processo onde são escolhidos os indivíduos que serão submetidos aos operadores genéticos, dá-se o nome de selecção.

Existem diversos métodos de selecção, sendo que esta é feita com base na aptidão dos indivíduos, ou seja, o seu valor na função objectivo.

Seleccção Proporcional ou Roda Roleta

Neste método, os indivíduos são colocados numa roleta onde a sua posição é proporcional à sua aptidão.

Dado que estão dispostos de uma forma semelhante à roda dos alimentos, os indivíduos com maior aptidão (maior fatia da roda) têm mais probabilidade de serem escolhidos.

A roleta roda N vezes, sendo N o número de indivíduos necessários para serem aplicados os operadores genéticos.

Seleccção por Ranking

Na selecção por ranking, os indivíduos são ordenados de acordo com o valor da aptidão que possuem, sendo-lhes atribuído a cada um, um número inteiro que indica a sua posição.

Os indivíduos melhor posicionados têm mais probabilidade de serem escolhidos.

Seleccção por Torneio

Ao contrário de outros métodos, na selecção por torneio os indivíduos não competem todos entre si. Aqui, a competição é feita por subconjuntos com o mínimo de dois indivíduos.

Os indivíduos mais aptos de cada subconjunto são os seleccionados.

Seleccção por Truncamento

Neste método, é definida uma percentagem entre 0 e 100% e os indivíduos seleccionados são os melhores $X\%$ da população, isto é, imaginemos que é definido que $X=50\%$. Então, 50% da população de melhores indivíduos será seleccionada e a restante descartada.

3.1.5 – OPERADORES GENÉTICOS

De forma a permitir a exploração de regiões desconhecidas do espaço de busca, com o objectivo de poderem ser encontradas regiões com melhores soluções, aplicam-se operadores genéticos responsáveis por modificar a população.

Os operadores genéticos mais utilizados são o de cruzamento e o de mutação.

3.1.5.1 – OPERADOR DE CRUZAMENTO

Este operador consiste basicamente em combinar informações de dois quaisquer indivíduos da população, de modo a que se criem dois novos indivíduos com melhores características que os anteriores.

Existem diversas formas de se efectuar o cruzamento, das quais se podem destacar o cruzamento 1-ponto e n-pontos, cruzamento uniforme e cruzamento média.

3.1.5.2 – OPERADOR DE MUTAÇÃO

O operador mutação é utilizado para diversificar a população, no sentido dos indivíduos não serem muito parecidos, provocando alterações de um ou mais genes do cromossoma.

Os dois tipos de mutação mais utilizados são a mutação clássica e o *creep*.

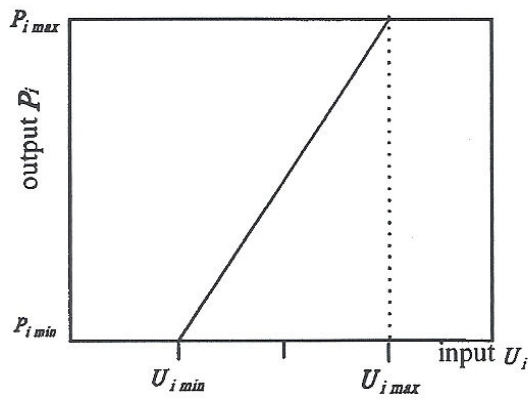
3.1.6 – CRITÉRIO DE PARAGEM

O critério de paragem é o critério adoptado que determina quando deve ser interrompida a execução do algoritmo.

Existem essencialmente três critérios, nomeadamente: o número de gerações, a convergência e o valor da função objectivo.

Onde os parâmetros A, B e C representam os coeficientes de ponderação, ou seja, são os parâmetros que revelam a importância de cada termo da equação.

Utilizando o modelo linear entrada - saída como modelo de neurónio, traduzido no gráfico 2, verifica-se que $U_{i\min}$ e $U_{i\max}$ são os limites mínimo e máximo da entrada do neurónio.



Gráf.2 – Modelo linear entrada - saída (modelo de neurónio) [18]

Pode demonstrar-se que a característica dinâmica de cada neurónio deste método, de acordo com o parâmetro do sistema de potência, é definido como [20] [23]:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{(Eq.4 - 69)}$$

Onde P_m é

$$\text{(Eq.70)}$$

E L_{i0} representa as perdas incrementais do gerador i , com geração P_{i0} :

$$\text{---} \tag{Eq.71}$$

A potência gerada pela unidade i é dada por:

$$\tag{Eq.72}$$

$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \tag{Eq.73}$$

$$\frac{\text{---} \quad \text{---}}{\text{---} \quad \text{---}} \tag{Eq.74}$$

Onde a equação 8 representa a potência gerada óptima, isto é, a solução do problema.

Um passo importantíssimo na solução do Despacho Óptimo através deste método é a selecção dos factores A, B e C. Uma das técnicas utilizadas está patente na referência [23].

3.2.1 – ALGORITMO

O método de resolução do problema sugerido por Amir Mohammadi e Mohammad Hadi Varahram, assenta no seguinte algoritmo [20]:

Passo 1: Introdução dos dados referentes à procura de carga P_D ; número de unidades; limites de produção; coeficientes de perdas (B_{ij} , B_{i0} e B_{00}); parâmetros de ponderação (A, B e C); parâmetros do custo de combustível (a_i , b_i e c_i) das centrais; parâmetros do modelo

neuronal (U_{\min} e U_{\max}); a tolerância da procura total e da solução de convergência ().

Passo 2: Iniciar a produção de cada central; iniciar o contador $k=0$ e definir $C=0$.

Passo 3: Determinar as perdas da rede (P_L) e as perdas incrementais.

Passo 4: Determinar P_m e () através da equação 74 e 73, respectivamente.

Passo 5: Calcular .

Passo 6: Verificar se alguma unidade viola os limites de produção e em caso afirmativo, passar para o passo 7. Em caso negativo, avançar para o 8.

Passo 7:

- a) Para cada unidade que viola os limites, aplicar a equação 72 para o tempo t de cálculo (computacional) que a unidade demorou a atingir o limite de produção.
- b) Com base nos valores de t , identificar que unidade atingiu primeiro os seus limites e definir a sua produção no valor limite.
- c) Excluir a unidade que primeiro viola os seus limites, das unidades disponíveis.
- d) Definir a diferença entre a carga total e a produção das unidades excluídas como sendo a nova carga do sistema.
- e) Voltar ao passo 4

Passo 8: Verificar se e se sim, passar ao passo 9. Caso contrário, ir para o passo 3.

Passo 9: Se para todas as unidades, ir para o passo 10. Em caso negativo, definir $k=k+1$ e voltar ao passo 3.

Passo 10: Termina o processo e são lançados os resultados.

3.3 – OPTIMIZAÇÃO DO ENXAME (*PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*)

Foi Kennedy e Eberhart, em 1995, que desenvolveram o algoritmo “*Particle Swarm Optimization*” (PSO), baseado no comportamento dos indivíduos (partículas ou agentes) de um grupo [24].

As suas raízes estão na modelação do movimento dos indivíduos (peixes, pássaros,...) dentro de um grupo.

Partindo daí, verificou-se que os membros do grupo partilhavam informações entre eles, conduzindo este facto, ao aumento da eficiência do grupo.

No algoritmo PSO, cada indivíduo corresponde a um candidato à solução do problema e a sua aproximação ao óptimo é feita mediante a velocidade actual, experiência prévia e pela experiência dos vizinhos.

Num espaço físico, a posição e velocidade de indivíduo i são representados como o vector \mathbf{p}_i e \mathbf{v}_i [19], no algoritmo PSO.

\mathbf{p}_{best} e \mathbf{p}_{best_i} são a melhor posição do indivíduo i e a melhor posição dos seus vizinhos, respectivamente.

A mudança de velocidade de cada indivíduo pode ser calculada utilizando a velocidade actual e a distancia entre \mathbf{p}_{best} e \mathbf{p}_{best_i} , como descreve a seguinte equação:

(Eq.75)

Onde:

- Velocidade do indivíduo i na iteração k
- ω – Parâmetro de ponderação
- Coeficientes de aceleração
- Números aleatórios entre 0 e 1

- Posição do indivíduo i na iteração k
 - Melhor posição do indivíduo i até à iteração k
 - Melhor posição do grupo até à iteração k

No processo de actualização da velocidade, o parâmetro de inércia ω é um valor que vai decrescendo linearmente desde ω_{\max} a ω_{\min} , do seguinte modo [19][25]:

(Eq.76)

Onde:

- $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ – Ponderação inicial e final
- $Iter_{\max}$ – Número máximo de iterações
- $Iter$ – Número da iteração actual

Cada indivíduo move-se da posição actual para a seguinte, num movimento traduzido pela expressão:

(Eq.77)

3.4 – TABU SEARCH ALGORITM

O “Tabu Search Algoritm” (TAS) é uma abordagem de pesquisa heurística que foi inicialmente abordada por Glover, em 1989 [17].

Este método assenta na utilização de uma memória flexível para manter a informação sobre o histórico da procura e utilizar essa informação para criar e explorar novas soluções.

Mais recentemente, Bland e Dawson apresentaram o TSA como uma ferramenta para a resolução de problemas de optimização.

O TSA tem como base o princípio do método da escalada da colina (Hill-Climbing), embora difira deste método na medida em que despreza as soluções actuais que conduzem a um valor pior da função objectivo, com a esperança de que se encontrará uma solução melhor.

Os dois principais componentes do TSA são a lista (“Tabu List” - TL) e o critério de aspiração (“Aspiration Criterion” - AC).

A TL guarda todos os movimentos que não são permitidos na actual solução. A TL consiste nas direcções dos movimentos e da sua frequência.

O AC é empregue para determinar qual o movimento que deve ser livre, isto é, se um determinado movimento estava proibido pelas restrições, quando o critério de aspiração é satisfeito, poderá efectuar-se esse movimento.

3.4.1- ALGORITMO

O TSA pode ser descrito pelo seguinte processo:

Início

Identificar a solução inicial

Criar uma TL vazia

Definir Melhor_Posição = Solução

Definir critério de paragem

Estado=Falso

Repetir

Se o valor da Solução > valor da Melhor_Posição **então**

Melhor Posição = Solução

Se o critério de paragem não for atingido **então**

Adicionar a Solução na TL

Se a TL estiver cheia **então**

Apagar a entrada mais antiga da TL

Encontrar uma Nova_Solução através de alguma transformação na Solução

Se não for encontrada Nova_Solução **ou**

Se não for encontrada uma melhor Nova_Solução à muito tempo **então**

Gerar Nova_Solução aleatoriamente

Se Nova_Solução não estiver na TL **então**

Solução = Nova_Solução

Fim

Ainda

Estado = Verdadeiro

Até que Estado = Verdadeiro

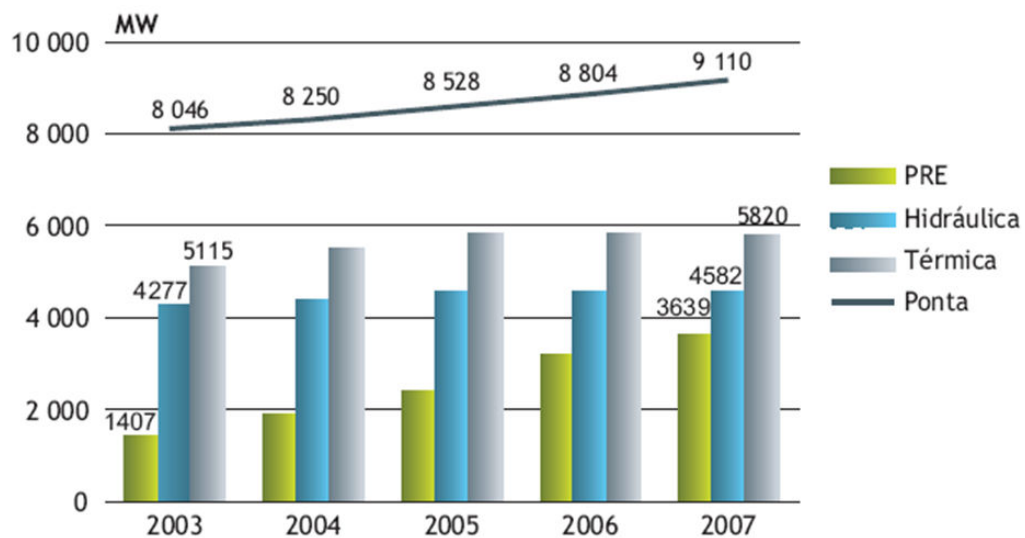
Capítulo 4

DESPACHO ÓPTIMO E COORDENAÇÃO HIDRO-TÉRMICA

4.1 – INTRODUÇÃO

A matriz energética de um país/região não compreende apenas as matérias-primas/recursos naturais utilizados para produção de energia eléctrica, mas também de outros sectores como sendo os transportes e a indústria.

No que respeita à produção de energia eléctrica, e no caso nacional, existe uma fracção significativa da potência instalada que está assente em centrais hidroeléctricas.



Gráf.3 – Evolução da potência nacional instalada por tecnologia [26]

A aposta nas centrais hidroeléctricas advém da combinação de factores estratégicos com a “abundância” dos recursos hídricos, isto é, aproveitando o grande potencial existente no nosso país, consegue-se contribuir para a diminuição da dependência externa.

Na actualidade, a este tipo de produção (renovável) tem-lhe sido atribuída uma importância acrescida no combate à redução das emissões de CO₂ (principal causa das alterações climáticas). Nesse sentido, têm vindo a ser anunciados novos investimentos na construção de novas barragens e reforço de algumas existentes.

“É importante ressaltar que, enquanto critérios de investimento, de segurança de abastecimento e até estratégicos, norteiam a decisão de expandir o sistema eléctrico

(tanto a capacidade de produção como a de transmissão), a política de operação de qualquer sistema existente será orientada para a redução de custos operativos – custos variáveis em função do regime de operação ou nível de despacho – para um determinado nível de segurança pré-estabelecido” [27].

A operação dos sistemas eléctricos é feita de forma centralizada, com base em diversas informações/dados do sistema, sendo que a coordenação de sistemas eléctricos que incorporam produção hidroeléctrica é geralmente mais complexa do que a gestão de um sistema puramente térmico [26].

Este facto deve-se a diversos condicionalismos, como sendo:

- Os sistemas hídricos encontram-se acoplados não só electricamente, mas também de forma hídrica (uma vez que os aproveitamentos são em cascata ao longo dos rios), dado que o funcionamento das centrais a jusante está dependente do funcionamento das que se encontram a montante;
- Cada sistema hídrico apresenta características distintas em função das diferenças naturais dos rios, tipo de barragem construída, queda de água, sistema de afluentes, etc.;
- O comportamento dos afluentes é sazonal e a sua previsão é complexa.

Desta forma, de modo a que seja tirado o máximo proveito das centrais hidroeléctricas, faz-se a gestão do planeamento e operação do sistema dividindo-a em três horizontes [27]:

- Médio Prazo – Nesta etapa determina-se a política de operação óptima, tendo em conta a capacidade de regulação das centrais com reservatório de acumulação (albufeiras). Neste ponto, é também contemplada a evolução do mercado e o plano de expansão do sistema;
- Curto Prazo – Na sequência do que foi determinado a médio prazo, é definida uma política de operação óptima por cada central, considerando algumas restrições de produção. Aqui as descargas dos afluentes já são tratadas de forma determinística;
- Programação da Operação – Nesta etapa, o problema da coordenação hidro-térmica é representado em detalhe. A rede eléctrica é representada

explicitamente e entram também aqui as curvas de rendimento das hidroeléctricas.

Com todos os dados, procedem-se a estudos de fluxos de potência e obtêm-se o despacho de todas as centrais.

Em algumas bibliografias, são apenas mencionados dois horizontes temporais: “Long-Term”[28] e “Short-Term” [29].

“O problema de coordenação hidro-térmica consiste na determinação da produção da energia eléctrica produzida a partir dos recursos hídricos em cada momento, de forma a minimizar os custos de produção (das centrais térmicas) tendo em consideração as diversas restrições do sistema (por expo. cotas mínimas e máximas, gestão de outros usos da água, etc.)” [26].

4.2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Diagrama Interpretativo

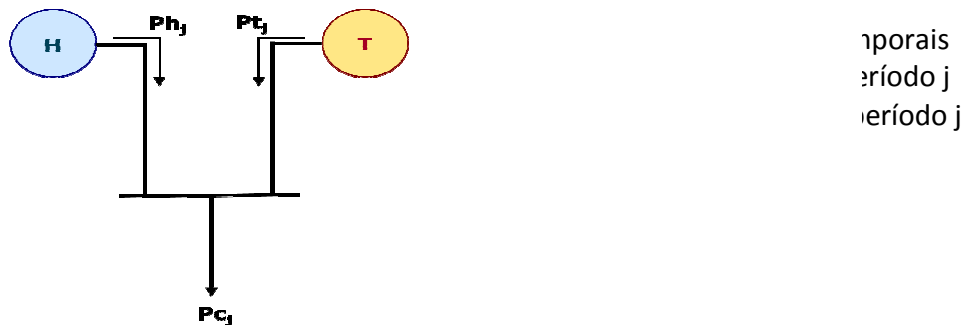


Fig.5 – Diagrama interpretativo da coordenação hidro-térmica [26]

Condições do Problema [26]

- A potência hídrica instalada é superior ao consumo em todos os períodos:

(Eq.78)

- A energia hídrica disponível não é suficiente para satisfazer o consumo em todos os períodos:

(Eq.79)

- O défice energético é coberto pela central térmica:

(Eq.80)

- A central térmica pode ser desligada em certos períodos.

Formulação do Problema

A função objectivo é:

(Eq.81)

(Eq.82)

O Lagrangeano vem:

(Eq.83)

A condição de primeira ordem é:

—

(Eq.84)

(Eq.85)

Considerando a representação típica da função de custo da central térmica:

(Eq.86)

O custo total de produção quando a central funciona durante T períodos de tempo será dada por:

(Eq.87)

Sabendo que a central térmica deverá fornecer a energia W_t , tem-se:

—

(Eq.88)

Substituindo na função de custo total, obtém-se:

—

(Eq.89)

A minimização do custo total de produção é dada por:

—

(Eq.90)

Capítulo 5

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA EFECTUAR O DESPACHO ÓPTIMO EM SEE

5.1 - FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Um dos objectivos desta tese era a elaboração de uma aplicação informática que resolvesse o problema do Despacho Ótimo em Sistemas Eléctricos de Energia.

Nesse sentido, foi desenvolvida uma aplicação no *software* "MathLab", cujas principais potencialidades são:

- Possibilidade de introdução dos dados do problema;
- Resolução do problema do despacho óptimo sem perdas;
- Resolução do problema do despacho óptimo com perdas.

Esta aplicação está muito completa e com poucas simplificações no método utilizado, uma vez que na resolução do despacho óptimo com perdas, é efectuado o trânsito de potências e o cálculo da matriz dos "coeficientes B" para cada iteração.

Contudo, a principal limitação desta ferramenta é não considerar os limites de transmissão das linhas.

5.1.1 - ESTRUTURA DA APLICAÇÃO

De forma a tornar a aplicação menos complexa e melhor estruturada, entendeu-se que esta deveria ser subdividida em pequenos programas (*m.files*).

De seguida, de uma forma resumida, são apresentados os diversos programas. Mais à frente (anexos), será apresentado o código de cada programa, onde está presente, através de comentários, uma explicação detalhada.

dados.m:

É através deste "programa" que se introduzem os dados do problema. Os dados têm que estar dispostos de acordo com o exemplo apresentado (disposição e unidades), de modo a não ser comprometido o funcionamento da aplicação.

Os dados a ser introduzidos dizem respeito a:

- Tensão nos barramentos de produção;
- Tipo de barramento;
- Nº e características das linhas (impedância; impedância shunt);
- Cargas e grupos geradores associadas a cada barramento;
- Curvas características de cada grupo gerador e o seu correspondente limite máximo e mínimo de funcionamento;
- Potência de base;
- Erro.

mat_admitancias.m:

Este programa constrói a matriz das admitâncias, recorrendo aos dados das linhas, mais precisamente, ao valor da resistência, reactância e admitância shunt.

coeficientes B.m:

Este programa permite calcular a matriz dos coeficientes B necessária para o cálculo do despacho óptimo com perdas.

semperdas.m:

A subrotina *semperdas.m*, tal como o nome sugere, permite efectuar a resolução do problema do despacho óptimo sem perdas.

É aqui utilizada a função de optimização quadrática “QUADPROG”, que permite, de uma forma muito simples, chegar à solução óptima, sem considerar a rede.

LoadFlow NR.m:

Este programa efectua o trânsito de potência, com base nos dados das cargas, características dos barramentos e tensões especificadas, pelo método de Newton Raphson. Os valores da tensão obtidos (modulo e ângulo) são necessários para a construção da matriz dos coeficientes B.

comperdas.m:

Este programa é o objecto principal do trabalho. Permite resolver o despacho óptimo considerando não só a característica dos diversos geradores, mas também os seus limites e as características da rede.

Neste trabalho, não se pretendeu efectuar apenas o despacho para um determinado valor de carga, mas sim, o despacho para vários valores, de forma a se poder construir um gráfico com os vários valores de produção de cada central, consoante os incrementos provocados nas cargas.

Quando se corre o programa, este vai chamar as subrotinas *dados.m* e *mat_admitancias.m* para carregar os dados do problema a resolver.

De seguida, inicia-se um ciclo que simula os vários aumentos de carga. Para cada nível de carga, são efectuados os procedimentos adequados para a obtenção do despacho óptimo. Este procedimento está representado no algoritmo de resolução do despacho óptimo com perdas.

Assim, este processo inicia-se com o despacho óptimo sem perdas, de forma a se encontrarem os valores iniciais das potências produzidas e um valor inicial para o custo marginal de produção (λ). Seguidamente, é chamado o programa que permite calcular o trânsito de potências de onde são retirados os valores das tensões nos barramentos, necessários para a construção da matriz dos coeficientes B. Por fim, inicia-se o ciclo que

permite fazer o cálculo do despacho óptimo com perdas, onde são calculados, para cada iteração, os valores das potências produzidas por cada gerador e das perdas do sistema. O ciclo termina quando é respeitado a equação do balanço energético, a menos de um erro. Enquanto a equação não é verificada, o valor do custo marginal de produção é ajustado e reinicia-se o ciclo. Quando é encontrada a solução, esta é adicionada a uma matriz que contém todas as soluções para os diferentes níveis de carga.

A apresentação dos resultados é efectuada através de gráficos, que permitem observar a evolução da produção de cada gerador e do custo marginal do sistema, para cada valor de carga.

5.2 - VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

De forma a se proceder à validação dos resultados obtidos através do programa desenvolvido, foi utilizado o exemplo presente na referência bibliográfica [7] (exemplo 13.4) e, cujos dados se passam a descrever:

Rede:

	Linhas			Barramentos				
	Séries Z		Shunt Y	Produção			Carga	
	R	X	R	Barr.	P	(V)/δº	X	Q
Linha 1 - 4	0.00744	0.0372	0.0775	1		1.0/0º	-	-
Linha 1 - 3	0.01008	0.0504	0.1025	1	3.18	1.0	-	-
Linha 2 - 3	0.00744	0.0372	0.0775	2	-	-	2.20	1.3634
Linha 2 - 4	0.01272	0.0636	0.1275	2	-	-	2.80	1.7352

* Valores de base: 230kW e 100MVA

Tab.1 – Dados de uma rede eléctrica

Geradores:

—
—

Resultados do despacho óptimo:

	Sem Perdas	Com Perdas
λ (€/MWh)	9.4545	9.8399
P_{g1} (pu)	1.8182	1.9022
P_{g2} (pu)	3.1818	3.1910

Tab.2 – Resultados do despacho óptimo

5.2.1 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

De forma a se proceder a uma análise sobre os valores obtidos através da ferramenta computacional, foram introduzidos os dados do exemplo do ponto anterior e fez-se correr o programa. Os resultados obtidos foram os seguintes:

	Sem Perdas	Com Perdas
λ (€/MWh)	9.4545	9.8367
P_{g1} (pu)	1.8182	1.9018
P_{g2} (pu)	3.1818	3.1901

Tab.3 – Resultados do despacho óptimo obtidos pela aplicação

5.2.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados do exemplo com os resultados obtidos através da ferramenta computacional, verifica-se facilmente que no despacho óptimo sem perdas os valores são exactamente iguais. Este acontecimento era previsível e pode ser explicado pelo facto do despacho sem perdas ser resolvido por intermédio da função de optimização própria do programa “MatLab” “QUADPROG”, não havendo ocorrido, até este ponto, qualquer cálculo/operação da ferramenta computacional.

No que respeita ao despacho óptimo com perdas, podemos comparar facilmente os resultados através da seguinte tabela:

	RESULTADOS DO EXEMPLO DA BIBLIOGRAFIA	RESULTADOS OBTIDOS COM A FERRAMENTA COMPUTACIONAL	DESVIOS	
			ABSOLUTO	%
λ (€/MWh)	9.8399	9.8367	0.0032	0.03%
P_{g1} (pu)	1.9022	1.9018	0.0004	0.21%
P_{g2} (pu)	3.1910	3.1901	0.0009	0.03%

Tab.4 – Comparação dos resultados do despacho com perdas

Consultando a tabela, é possível observar que os resultados obtidos através da ferramenta computacional apresentam desvios de ordem muito reduzida.

Desta forma, podemos concluir que, os resultados produzidos pela aplicação são bastante precisos e fiáveis.

5.3 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Neste ponto, são descritos os dados de uma rede com dimensão superior à utilizada na validação de resultados e feita uma análise dos resultados obtidos com ferramenta computacional.

A rede objecto de estudo apresenta a seguinte configuração:

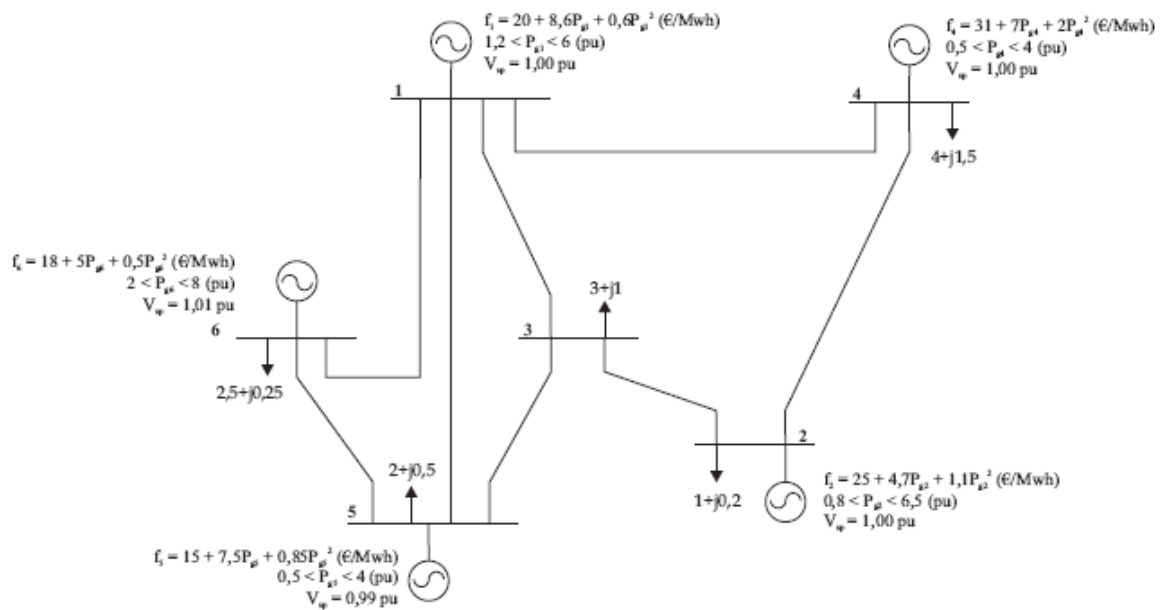


Fig.6 – Esquema de uma rede eléctrica

	Linhas		
	Séries Z		Shunt Y
	R	Z	R
Linha 1 - 4	0.00744	0.0372	0.0775
Linha 1 - 3	0.01008	0.0504	0.1025
Linha 2 - 3	0.00744	0.0372	0.0775
Linha 2 - 4	0.00272	0.0636	0.1275
Linha 1 - 5	0.00272	0.0636	0.1275
Linha 3 - 5	0.00272	0.0636	0.1275
Linha 5 - 6	0.00272	0.0636	0.1275
Linha 1 - 6	0.01272	0.0636	0.1275

Tab.5 – Características da rede eléctrica

Resultados obtidos pela aplicação:

Despacho Óptimo Sem Perdas

Carga Total	12.500	13.750	15.1250	16.6375	18.3013	20.1314	22.1445	22.3590	26.7949	29.4743
λ Global	10.5450	10.9448	11.3847	11.8685	12.4007	12.9861	13.9265	14.9680	16.3160	21.735
	1.6208	1.9540	2.3206	2.7238	3.1673	3.6551	4.4387	5.3067	6.0000	6.0000
	2.6568	2.8386	3.0385	3.2584	3.5003	3.7664	4.1939	4.6673	5.2800	6.2221
	0.8862	0.9862	1.0962	1.2171	1.3502	1.4965	1.7316	1.9920	2.3290	2.8472
	1.7912	2.0264	1.2851	2.5697	2.8828	3.2271	3.7803	3.3930	5.1859	6.4051
	5.5450	5.9448	6.3847	6.8685	7.4007	7.9861	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000

Despacho Ótimo Com Perdas

Carga Total	12.500	13.750	15.1250	16.6375	18.3013	20.1314	22.1445	22.3590	26.7949	29.4743
λ Global	10.8569	11.2978	11.7857	12.3256	12.9237	13.6738	14.8086	16.0892	17.8777	21.2080
	1.6231	1.9532	2.3163	2.7156	3.1548	3.7003	4.4966	5.3758	6.0000	6.0000
	2.6559	2.8421	3.0476	3.2743	3.5246	3.8369	4.2937	4.8013	5.4899	6.5000
	0.8687	0.9675	1.0763	1.1959	1.3276	1.4913	1.7302	1.9944	2.3509	2.9742
	1.8854	2.1344	2.4091	2.7122	3.0469	3.4644	4.0786	4.7626	5.6928	7.0000
	5.6207	6.0343	6.4907	6.9942	7.5500	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000

Tab.6 – Resultados obtidos pela aplicação

Análise dos resultados:

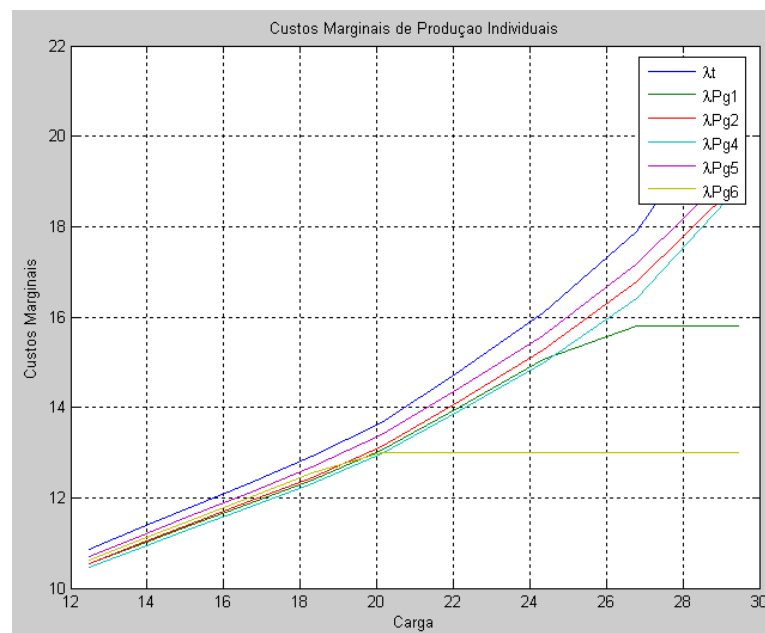
Através de uma análise aos resultados obtidos para o despacho ótimo com perdas, é possível verificar que o gerador 5 (P_{g6}) é o que mais contribui para a alimentação da carga do sistema. Tal facto deve-se a este apresentar uma curva característica mais favorável do ponto de vista económico. Desta forma, e analisando os gráficos obtidos, constata-se que este gerador atinge o limite máximo de produção para uma carga ligeiramente superior a 20pu (2000MW).

Por outro lado, o gerador instalado no barramento 4 (P_{g5}) apresenta a menor contribuição para alimentação da carga, mesmo existindo uma carga de elevada potência nesse barramento. Dai se pode concluir que, é economicamente mais vantajoso suportar o custo das perdas causadas pela alimentação desta carga a partir de outros geradores do sistema, do que ser este gerador a alimentar esta carga.

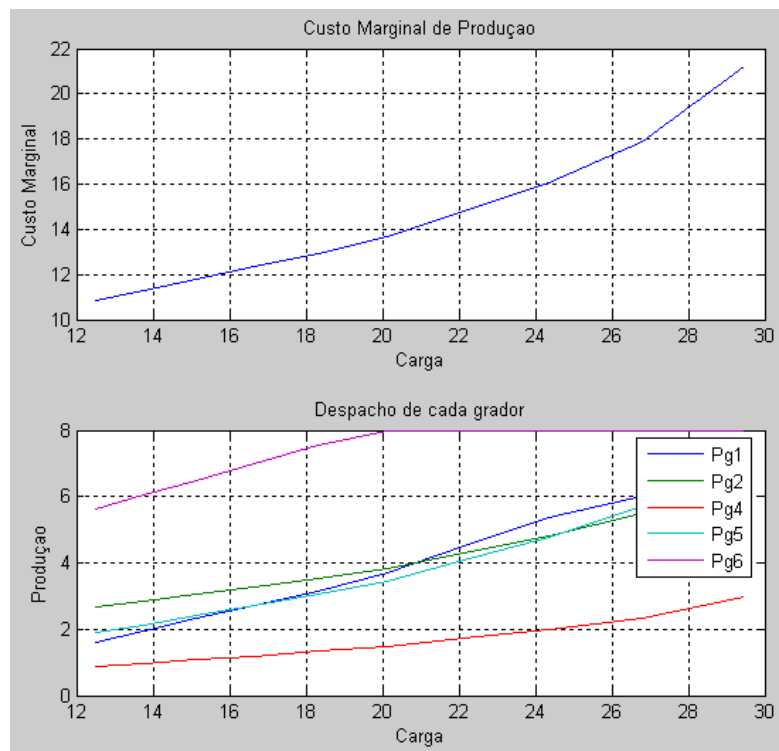
Verifica-se também, que com o aumento da carga, os geradores que possuem curvas semelhantes (P_{g1} , P_{g2} e P_{g5}), vão tendo contributos também semelhantes.

Pela análise do gráfico dos custos marginais de produção, pode-se concluir, que tal como era espectável, que o custo marginal global do sistema é superior aos custos marginais individuais de cada gerador.

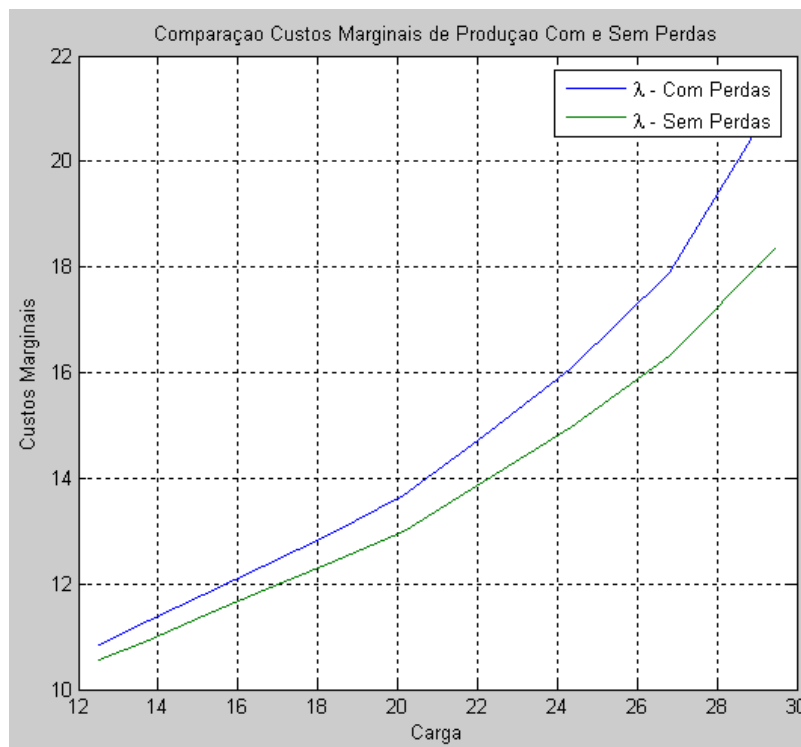
Por fim, o gráfico comparativo dos custos marginais de produção para o despacho com e sem perdas, demonstra também, tal como era previsível, que os custos marginais de produção para a solução com perdas são superiores aos sem perdas. Isto deve-se ao facto de existir um custo associado à alimentação das perdas de transmissão nas linhas.



Gráf.4 – Custos marginais de produção individuais



Gráf.5 – Custo marginal global de produção e despacho de cada gerador



Gráf.6 – Custos marginais de produção com e sem perdas

Capítulo 6

CONCLUSÃO

6 - CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho pretendeu-se demonstrar a importância que a gestão dos Sistemas Eléctricos tem, no sentido de minimizar os seus custos de operação.

Foram abordados os diferentes períodos de gestão de um Sistema Eléctrico, quer em contexto de sistema isolado, quer par aos novos modelos de mercado liberalizado.

Verifica-se que o Despacho Óptimo é uma ferramenta importantíssima na exploração eficiente de um Sistema Eléctrico. Contudo, esta premissa é válida essencialmente em contexto de monopólio estatal e/ou em sistemas isolados, pelo que, atendendo à evolução dos Sistemas Eléctricos, esta ferramenta vai perdendo o seu sentido.

Apesar da simplicidade do despacho óptimo sem perdas, verifica-se que as simplificações/omissões introduzidas neste processo conduzem a que os resultados obtidos desta forma não reflectam uma imagem real daquilo que ocorre no sistema, sendo, no entanto, suficientes para determinados tipos de análise.

Durante a realização deste trabalho, nomeadamente no desenvolvimento da ferramenta computacional, constatou-se que as maiores dificuldades de programação não estão relacionadas no problema do despacho óptimo em si, mas sim em cálculos “auxiliares” implícitos para a sua resolução, como sendo o cálculo da matriz dos coeficientes B e o trânsito de potências.

Como sugestão para trabalhos futuros a desenvolver neste tema, sugere-se a consideração dos limites de transmissão das linhas.

INDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Estrutura do sector eléctrico verticalmente integrada [2]

Fig.2 - Esquema de um grupo térmico com caldeira, turbina e alternador [5]

Fig.2 [7] – a) Sistema eléctrico composto por quatro barramentos

b) Interpretação da “corrente sem carga” I_n^0 , usada na Eq.15

c) Situação em que o barramento possui produção e consumo

Fig.3 [7] – a) Sistema eléctrico composto por quatro barramentos;

b) Conceito de centro de carga do sistema;

c) Mudança do barramento de referência do nó N para o nó D.

Fig.4 – Algoritmo do despacho óptimo com perdas

Fig.5 – Diagrama interpretativo da coordenação hidro-térmica [26]

Fig.6 – Esquema de uma rede eléctrica

INDICE DE TABELAS

Tab.1 – Dados de uma rede eléctrica

Tab.2 – Resultados do despacho óptimo

Tab.3 – Resultados do despacho óptimo obtidos pela aplicação

Tab.4 – Comparação dos resultados do despacho com perdas

Tab.5 – Características da rede eléctrica

Tab.6 – Resultados obtidos pela aplicação

INDICE DE GRÁFICOS

Gráf.1 – Curva típica do consumo de combustível em função da potência eléct. de saída [2]

Gráf.2 – Modelo linear entrada - saída (modelo de neurónio) [18]

Gráf.3 – Evolução da potência nacional instalada por tecnologia [26]

Gráf.4 – Custos marginais de produção individuais

Gráf.5 – Custo marginal global de produção e despacho de cada gerador

Gráf.6 – Custos marginais de produção com e sem perdas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aguiar, Manuel J. Q., “Modelo de Despacho e Unit Commitment em Ambiente de Mercado”, Relatório de Estágio PRODEP III.
- [2] Pereira, Adelino Jorge Coelho, “Despacho dos Serviços de Sistema em Mercado Competitivo de Energia Eléctrica”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [3] António Gómez Espósito, “Análisis y Operacion de Sistemas de Energia Eléctrica”, McGraw-Hill.
- [4] Robert H. Miller, “Operação de Sistemas de Potência”, McGraw-Hill.
- [5] Jorge A. M. Sousa, “Despacho Económico de Grupos Térmicos de Produção de Energia Eléctrica”, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dezembro 2005.
- [6] Ademaro A. M. B. Cotrim, “Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Eléctrica”, McGraw-Hill.
- [7] John J. Grainger, William D. Jr. Stevenson, “Power System Analysis”, McGraw-Hill.
- [8] Sucena Paiva, José Pedro, “Redes de Energia Eléctrica – Uma Análise Sistémica”. IST Press.
- [9] A. B. M. Nasiruzzaman e M. G. Rabbani, “ An Educational Propose GUI for Evolutionary Computation in Economic Dispatch Problem”, IEEE, 5ª Conferência de Engenharia Eléctrica e Computadores, Dhaka, Bangladeche, Dezembro de 2008.
- [10] Wood, Allen J., Wollenberg, Bruce F., “ Power Generator, Operation and Control”, Wiley-Interscience.

- [11] M. A. Abido, “Multiobjective Optimal VAR Dispatch Using Strength Pareto Evolutionary Algorithm”, IEEE, Congresso n Evolutionary Computation, Vancouver, Canada, 2006.
- [12] C. E. Lin, S. T. Chen, C. L. Huang, “A Direct Newton-Raphson Economic Dispatch”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, Agosto 1992.
- [13] J. Catalão, “Optimização da Exploração de Recursos Térmicos Considerando a Restrição de Emissões”, Associação portuguesa de Investigação Operacional, 2006.
- [14] Altimari Samed, Márcia, Rosemeire Gomes, Mauro, “Um Algoritmo Genético Híbrido Aplicado ao Problema do Despacho Econômico”, Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química.
- [15] Hamid Bouzeboudja, Albdelkader Chaker, Ahmed Allali e Bakhta Naama, “Economic Dispatch Solution using a Real-Coded Genetic Algorithm”, IEEE, Acta Electrotechnica et Informatica No. 4, Vol. 5, 2005.
- [16] A. Bakirtzis, V. Petridis, S. Kazarlis, “Genetic Algorithm Solution to the Economic Dispatch Problem”, IEEE, 1994.
- [17] S. Khamsawang, C. Boonseng, S. Pothiya, “Solving the Economic Dispatch Problem with Tabu Search Algorithm”, IEEE, 2002.
- [18] Ching-Tzong Su, Chien-Tung Lin, “New Approach with a Hopfield Modeling Framework to Economic Dispatch”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, Maio 2000.
- [19] Jong-Bae Park, Yun-Won Jeong, Woo-Nam Lee, Joong-Rin Shin, “An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch Problems with Non-Smooth Cost Functions”, IEEE, 2006.

- [20] Amir Mohammadi, Mohammad Hadi Varahram, "Using Neural Network for Solving of on-line Economic Dispatch Problem", IEEE, International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, 2006.
- [21] A. Immanuel Selvakumar, K. Thanushkodi, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, Fevereiro 2007.
- [22] J. H. Park, Y. S. Kim, K. Y. Lee, "Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Network", IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, Agosto 2003.
- [23] M. R. Farooqi, P. Jain, K. R. Niazi, "Using Hopfield Neural For Economic Dispatch of Power Systems", IEEE, National Power and Energy Conference, Bangi, Malaysia, 2003.
- [24] James Kennedy, Russell Eberhart, "Particle Swarm Optimization", IEEE, 1995.
- [25] Woo-Nam Lee, Yun-Won Jeong, Jong-Bae Park, Joong-Rin Shin, Kwang Y. Lee, "Development of an Educational Simulator for Particle Swarm Optimization and Economic Dispatch Applications", IEEE.
- [26] Mendes de Sousa, Jorge Alberto, "Coordenação hidro-térmica", Mercados de Energia, Mestrado em Engenharia Electrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [27] Amendola, Alexandre Ferreira, "Meta-heurísticas de Optimização Aplicadas à Coordenação hidro-térmica", Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [28] Monica S. Zambelli, Ivette Luna, Secundino Soares, "Long-Term Hydropower Scheduling Based on Deterministic Nonlinear Optimization and Annual Inflow Forecasting Models", IEEE Power Tech Conference, Roménia, Junho 2009.

- [29] M. Kadowaki, T. Ohishi, L. S. A. Martins, S. Soares, “Short-Term Hydropower Sheduling via an Optimization-Simulation Decomposition Approach”, IEEE Power Tech Conference, Roménia, Junho 2009.
- [30] Manuel Matos, “Introdução ao Problema de Escalonamento e Pré-Despacho”, Apontamentos da disciplina de DOSE, Faculdade de Engenharia do Porto, 2000.
- [31] Manuel Matos, “OPF básico – Exemplo de Aplicação dos Conceitos de Optimização não Linear”, Notas para a disciplina de DOSE, FEUP, 2004.
- [32] Barbosa, F. Maciel, “Exploração de Sistemas Eléctricos de Energia”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Março 2006.
- [33] Gerald F. Reid, Lawrence Hasdorff, “Economic Dispatch Using Quadratic Programming”, IEEE, 1972.
- [34] T.Yalcinoz, H. Altun e M. Uzam, “ Economic Dispatch Solution Using a Genetic Algorithm Based on Arithmetic Crossover”, IEEE, Porto Power Tech Conference, Setembro de 2001.
- [35] A. Bakirtzis, V. Petridis, S. Kazarlis, “Genetic Algorithm Solution to the Economic Dispatch Problem”, IEEE, 1994.
- [36] Amir Mohammadi, Mohammad Hadi Varahram, “Using Neural Network for Solving of on-line Economic Dispatch Problem”, IEEE, International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, 2006.
- [37] Ching-Tzong Su, Chien-Tung Lin, “New Approach with a Hopfield Modeling Framework to Economic Dispatch”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, Maio 2000.
- [38] A. Immanuel Selvakumar, K. Thanushkodi, “A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, Fevereiro 2007.

- [39] Jong-Bae Park, Yun-Won Jeong, Woo-Nam Lee, Joong-Rin Shin, “An Improved Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch Problems with Non-Smooth Cost Functions”, IEEE, 2006.
- [40] S. Khamsawang, S. Pothiya, C. Boonseng, “Distributed Tabu Search Algorithm for Solving the Economic Dispatch Problem”, IEEE, 2004.
- [41] S. Khamsawang, C. Boonseng, S. Pothiya, “Solving the Economic Dispatch Problem with Tabu Search Algorithm”, IEEE, 2002.
- [42] J. Catalão, “Optimização da Exploração de Recursos Térmicos Considerando a Restrição de Emissões”, Associação portuguesa de Investigação Operacional, 2006.
- [43] Zhang Yang, Wang Haining, Zhang Zhigang, Zhang Rui, “A Practical Method for Solving Economic Dispatch Problem”, IEEE, 2002.
- [44] T. Aruldoss Albert Victoire, P. N. Suganthan, “Differential Evolution and Evolutionary Programming for Solving Non-convex Economic Dispatch Problems”, IEEE, 2008.
- [45] Derong Liu, Ying Cai, “Taguchi Method for Solving the Economic Dispatch Problem with Nonsmooth Cost Functions”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 4, Novembro 2005.
- [46] Daniel Bratton, James Kennedy, “Defining a Standard for Particle Swarm Optimization”, IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2007.
- [47] A. M. Moradi, A. B. Dariane, “Particle Swarm Optimization: Application to Reservoir Operation Problems”, IEEE International Advance Computing Conference, 2009.
- [48] Bassel Soudan, Mohamed Saad, “An Evolutionary Dynamic Population Size PSO Implementation”, IEEE.
- [49] Sai H. Ling, Herbert H. C. Lu, Kit Y. Chan, Shu K. Ki, “Economic Load Dispatch: A New Hybrid Particle Swarm Optimization Approach”, IEEE, Setembro 2007.

- [50] Ahmed Yousuf Saber, Atsushi Yona, Masatake Higashi, “Economic Load Dispatch of Higher Order Cost Polynomials Using Modified Particle Swarm Optimization”, IEEE, 2007.
- [51] T. Adhinarayanan, Maheswarapu Sydulu, “Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Cubic Fuel Cost Function”, IEEE, 2006.
- [52] Amir Mohammadi, Mohammad Hadi Varahram, Iraj Kheirizad, “Online Solving of Economic Dispatch Problem using Neural Network Approach and Comparing it with Classical Method”, IEEE 2nd International Conference on Emerging Technologies, Paquistão, Novembro 2006.
- [53] M. R. Farooqi, P. Jain, K. R. Niazi, “Using Hopfield Neural Network for Economic Dispatch of Power Systems”, IEEE National Power and Energy Conference, Malásia, 2003.
- [54] J. H. Park, Y. S. Kim, I. K. Eon, K. Y. Lee, “Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function using Hopfield Neural Network”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, Agosto 1993.
- [55] Rukmi Sari Hartati, M. E. El-Hawary, “A Summary of Applications of Hopfield Neural Network to Economic Load Dispatch”, IEEE, 2000.
- [56] Whei-Min Lin, Fu-Sheng Cheng, Ming-Tong Tsay, “An Improved Tabu Search for Economic Dispatch with Multiple Minima”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, Fevereiro 2002.
- [57] A. L. M. Marcato, A. G. Mendes, A. M. lung, T. C. César, M. Barros, R. C. Souza, A. C. C. Santos, I. C. S. Junior, R. B. S. Brandi, T. P. Ramos, “Incorporation of Rationing Effects to Hydrothermal Dispatch Optimization”, IEEE Power Tech Conference, Roménia, Junho 2009.

- [58] Kaveh Abookazemi, Mohd Wazir Mustafa, “Unit Commitment Optimization using Improved Genetic Algorithm”, IEEE Power Tech Conference, Roménia, Junho 2009.
- [59] S. J. P. S. Mariano, M. R. A. Calado, L. A. F. M. Ferreira, “Dispatch of Head Dependent Hydro Units: Modeling for Optimal Generation in Electricity Market”, IEEE Power Tech Conference, Roménia, Junho 2009.

ANEXOS

dados.m

```
% ##### DADOS #####  
% Numero de barramentos  
nbar=6;  
  
% Caracteristicas das linhas  
X(pu) Ysh(pu) linhas=[Bar_inc. Bar_fim R(pu)  
linhas=[1 4 0.00744 0.0372 0.0775  
1 3 0.01008 0.0504 0.1025  
2 3 0.00744 0.0372 0.0775  
2 4 0.00272 0.0636 0.1275  
1 5 0.00272 0.0636 0.1275  
3 5 0.00272 0.0636 0.1275  
5 6 0.00272 0.0636 0.1275  
1 6 0.01272 0.0636 0.1275];  
  
% Caracteristicas das cargas  
cargas=[Bar P Q]  
cargas=[2 1 0.2  
3 3 1  
4 4 1.5  
5 2 0.5  
6 2.5 0.25];  
  
% Tensoes Especificadas  
usp=[Bar U(pu)]  
usp=[1 1.00  
2 1.00  
4 1.00  
5 0.99  
6 1.01];  
  
% Tipo de Barramento  
tipo=['V'; 'V'; 'Q'; 'V'; 'V'; 'R'];
```

```

% Funções Custo dos Geradores          C(x,x)=[c(valor const.)
b(primeira ordem) a(segunda ordem) Pmin Pmax]
C(1,:)=[20 8.6 0.6 1.2 6];
C(2,:)=[25 4.7 1.1 0.8 6.5];
C(3,:)=[31 7 2 0.5 4];
C(4,:)=[15 7.5 0.85 1.5 7];
C(5,:)=[18 5 0.5 2 8];

% Erro
erro=10^-6;

```

mat_admitancias.m

```

%Constroi a matriz das admitâncias e das impedancias
Y=zeros(nbar,nbar);
[L1 L2]=size(linhas);

for k=1:L1
    Y(linhas(k,1),linhas(k,2))=-1/(linhas(k,3)+i*linhas(k,4));
    % Elemento k,j

    Y(linhas(k,2),linhas(k,1))=-1/(linhas(k,3)+i*linhas(k,4));
    % Elemento j,k

    Y(linhas(k,1),linhas(k,1))=Y(linhas(k,1),linhas(k,1))+1/(linhas(k,3)+
    i*linhas(k,4))+i*linhas(k,5)/2; % Elemento k,k

    Y(linhas(k,2),linhas(k,2))=Y(linhas(k,2),linhas(k,2))+1/(linhas(k,3)+
    i*linhas(k,4))+i*linhas(k,5)/2; % elemento j,j
end

Z=inv(Y);

```

```
Zr=real(Z);
Zi=imag(Z);
```

semperdas.m

```
##### DESPACHO OPTIMO SEM PERDAS DE TRANSMISSAO#####
% DEVOLVE O VALOR DE LAMBDA
[m,n]=size(C);           % m fica com o numero de geradores do sistema
[nlin ncol]=size(cargas); % nlin fica com o numero de cargas do sistema
pc=sum(cargas(:,2));     % Calcula a Potencia de Carga

for (k=1:m)              % Constroi as matrizes necessarias para a
execucao do Quadprog
    H(k,k)=C(k,3)*2;
    f(k)=C(k,2);
    b(k)=-C(k,4);
    b(k+m)=C(k,5);
    A(k,k)=-1;
    A(k+m,k)=1;
    beq(1)=pc;
    Aeq(1,k)=1;
end

[x,fval,exitflag,output,lambda] = quadprog(H,f',A,b',Aeq,beq'); %
Calcula a solucao do Despacho Optimo Sem Perdas
```

LoadFlow NR.m

```
##### TRANSITO DE POTENCIAS #####
%Pinjectadas e Qinjectadas
pinj=zeros(nbar,1);
qinj=zeros(nbar,1);
```

```
for k=1:size(usp(:,1))
    pinj(usp(k,1))=pg0(k);
    for j=1:size(cargas(:,1))
        if cargas(j,1)==usp(k,1)
            pinj(usp(k,1))=x(k)-cargas(j,2);
        end
    end
end

for k=1:size(cargas(:,1))
    if tipo(cargas(k,1))=='Q'
        pinj(cargas(k,1))=-cargas(k,2);
    end
    qinj(cargas(k,1))=-cargas(k,3);
end

%método
U=[];
for k=1:size(usp(:,1))
    U(usp(k,1))=usp(k,2);
end;

for k=1:nbar
    if tipo(k)=='Q'
        U(k)=1;
    end
end

flagn=0;
while (flagn==0)
    for k=1:nbar
        Ical(k)=Y(k,:)*U(:);
        Scal(k)=U(k)*conj(Ical(k));
    end
end
```

```

end

% H
noi=0;
for k=1:nbar
    if (tipo(k)~='R')
        noi=noi+1;
    end;
    noj=0;
    for j=1:nbar
        if (tipo(j)~='R')
            noj=noj+1;
        end;
        if (tipo(k)~='R') && (tipo(j)~='R')
            if k==j
                if tipo(k)=='Q'
                    H1(noi,noj)=-qinj(k)-imag(Y(k,k))*abs(U(k))^2;
                end;
                if tipo(k)=='V'
                    H1(noi,noj)=-imag(Scal(k))-
imag(Y(k,k))*abs(U(k))^2;
                end;
            end;
            if k~=j
                H1(noi,noj)=abs(U(k))*abs(U(j))*(real(Y(k,j))*sin(
angle(U(k))-angle(U(j)))-imag(Y(k,j))*cos(angle(U(k))-
angle(U(j))));
            end;
        end;
    end;
end;

% N
noi=0;
for k=1:nbar

```

```

    if (tipo(k)~='R')
        noi=noi+1;
    end;
    noj=0;
    for j=1:nbar
        if (tipo(j)~='R') && (tipo(j)~='V')
            noj=noj+1;
        end;
        if (tipo(k)~='R') && (tipo(j)=='Q')
            if k==j
                N(noi,noj)=pinj(k)+real(Y(k,k))*abs(U(k))^2;
            end;
            if k~=j
                N(noi,noj)=abs(U(k))*abs(U(j))*(real(Y(k,j))*cos(angle(U(k))-angle(U(j)))+imag(Y(k,j))*sin(angle(U(k))-angle(U(j))));
            end;
        end;
    end;
end;

%M
noi=0;
for k=1:nbar
    if (tipo(k)~='R') & (tipo(k)~='V')
        noi=noi+1;
    end;
    noj=0;
    for j=1:nbar
        if (tipo(j)~='R')
            noj=noj+1;
        end;
        if (tipo(k)=='Q') && (tipo(j)~='R')
            if k==j

```

```

      M(noi,noj)=pinj(k)-real(Y(k,k))*abs(U(k))^2;
    end;
    if k~=j
      M(noi,noj)=-
      abs(U(k))*abs(U(j))*(real(Y(k,j))*cos(angle(U(k))-
      angle(U(j)))+imag(Y(k,j))*sin(angle(U(k))-
      angle(U(j))));
    end;
  end;
end;

%L
noi=0;
for k=1:nbar
  if (tipo(k)~='R')&&(tipo(k)~='V')
    noi=noi+1;
  end;
  noj=0;
  for j=1:nbar
    if (tipo(j)~='R')&&(tipo(j)~='V')
      noj=noj+1;
    end;
    if (tipo(k)=='Q')&&(tipo(j)=='Q')
      if k==j
        L(noi,noj)=qinj(k)-imag(Y(k,k))*abs(U(k))^2;
      end;
      if k~=j
        L(noi,noj)=abs(U(k))*abs(U(j))*(real(Y(k,j))*sin(angle(
        U(k))-angle(U(j)))-imag(Y(k,j))*cos(angle(U(k))-
        angle(U(j))));
      end;
    end;
  end;
end;
end;

```

```
end;

%J
J=[H1 N;M L];

noi=0;
noj=0;

for k=1:nbar
    if tipo(k)~='R'
        noi=noi+1;
        deltaP(noi)=pinj(k)-real(Scal(k));
    end;
    if (tipo(k)=='Q')
        noj=noj+1;
        deltaQ(noj)=qinj(k)-imag(Scal(k));
    end;
end;

delta=[deltaP';deltaQ'];
acrescimos=J^-1*delta;
noi=0;
noj=0;

for k=1:nbar
    if tipo(k)~='R'
        noi=noi+1;
        deltaT(k)=acrescimos(noi);
    end;
end;

for k=1:nbar
    if tipo(k)=='Q'
        noi=noi+1;
```

```
        deltaU(k)=acrescimos(noi)*abs(U(k));
    end;
end;

for k=1:nbar
    if tipo(k)=='Q'
        teta(k)=angle(U(k))+deltaT(k);
        U(k)=(abs(U(k))+deltaU(k))*(cos(teta(k))+i*sin(teta(k)));
    end;
    if tipo(k)=='V'
        teta(k)=angle(U(k))+deltaT(k);
        U(k)=abs(U(k))*(cos(teta(k))+i*sin(teta(k)));
    end;
end;

flagn=1;

for k=1:nbar
    Ical(k)=Y(k,:)*U(:);
    Scal(k)=U(k)*conj(Ical(k));
    if tipo(k)=='Q'
        if (abs(pinj(k)-real(Scal(k))))>erro
            flagn=0;
        end;
        if (abs(qinj(k)-imag(Scal(k))))>erro
            flagn=0;
        end;
    end;
    if tipo(k)=='V'
        if (abs(pinj(k)-real(Scal(k))))>erro
            flagn=0;
        end;
    end;
end;
end;
```

coeficientes B.m

```
##### CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DOS COEFICIENTES B #####

% Ajustar matriz R
nbar1=nbar;
zcoefb=Z;
Ucoefb=U;
Scoefb=Scal;
tipol=tipo;
[ngp ngp1]=size(usp);
[nlin ncol]=size(cargas);

for k=1:nlin
    for j=1:ngp
        if cargas(k,1)==usp(j,1)
            zcoefb=[zcoefb zcoefb(:,cargas(k,1))
                    zcoefb(cargas(k,:),:)+zcoefb(cargas(k,1),cargas(k,1))];
            tipol=[tipol;'Q'];
            Scoefb=[Scoefb (cargas(k,2)+cargas(k,3)*i)];
            Scoefb(cargas(j,1))=pg0(j);
            Ucoefb=[Ucoefb Ucoefb(cargas(k,1))];
            nbar1=nbar1+1;
        end
    end
end

Ycoefb=inv(zcoefb);

% Calcular correntes de carga
Ic=[];
a=0;
for k=1:nbar1
    if tipol(k)=='Q'
        a=a+1;
    end
end
```

```

    Ic(a,1)=k;
    Ic(a,2)=(real(Scoefb(k))-imag(Scoefb(k))*i)/conj(Ucoefb(k));
  end
end

% Calcular coeficientes d

[a1 a2]=size(Ic);
sumic=sum(Ic(:,2));
d=zeros(ngp,ngp);

for k=1:ngp
    d(k,k)=1;
end

d=[d zeros(ngp,1); zeros(nbar1-ngp,ngp+1)];

for k=1:a1
    d(k+ngp,ngp+1)=Ic(k,2)/sumic;
end

% Calcular coeficientes t

t=zeros(ngp,ngp);

for k=1:ngp
    t(k,k)=1;
end

t=[t zeros(ngp,1); zeros(1,ngp+1)];
sumic1=0;

for k=ngp:nbar1
    if tipo1(k)=='Q'
        sumic1=sumic1+d(k,ngp+1)*zcoefb(1,k);
    end
end

```

```
end
end

for k=1:ngp
    t(ngp+1,k)=-zcoefb(1,usp(k,1))/sumic1;
end

sumic3=0;

for k=1:length(tipo)
    if tipo1(k)=='R'
        ref=k;
        % Calcular In0
        In0=-Ucoefb(k)/zcoefb(k,k);
        break
    end
end

for k=1:ngp
    sumic3=sumic3+1;
    if usp(k,1)==ref
        break
    end
end

t(ngp+1,ngp+1)=t(ngp+1,sumic3);

%Calcular Matriz C
c=d*t;

% Calcular alfas
alfas=zeros(ngp+1,ngp+1);
alfas(ngp+1,ngp+1)=In0;
% Coeficientes dos geradores

for k=1:ngp
```

```

    alfas(k,k)=(1-
(imag(Scoefb(usp(k,1)))/real(Scoefb(usp(k,1))))*i)/conj(Ucoefb(usp(k,1)))
;
end

% Calcular B
B=real(alfas*c'*real(zcoefb)*conj(c)*conj(alfas));

```

comperdas.m

```

% ##### DESPACHO OPTIMO COM PERDAS DE TRANSMISSAO #####

close all
clear all

dados; % Carrega os dados do problema
mat_admitancias; % Constroi a Matriz Y e Z

resultadossemperdas=[];
resultadoscomperdas=[];
resulpg=[];
resultadoslambdas=[];
resullambda=[];

for w=1:10
    semperdas; % Chama o programa de resolucao do despacho
sem perdas e devolve o lambda inicial
    hp=lambda.eqlin;
    hp0=0;
    pg0=x;
    flag=0;

    resul1=[sum(cargas(:,2));abs(hp);pg0];

```

```

resultadossemperdas=[resultadossemperdas result1];
resultpgs=[resultpg x];

LoadFlow_NR;
coeficientes_B           % Calcular a matriz dos coeficientes B

while flag==0
    hp=abs (hp) ;
    A1=zeros (m,m) ;           % Calculo do novos Pgi
    A2=zeros (m,1) ;

    for k=1:m
        A1 (k,k) = ( C (k,3) *2) /hp) +2*B (k,k) ;
        A2 (k) = (1-B (k,m+1) ) - ( C (k,2) /hp) ;
        for j=k+1:m
            A1 (k,j) =2*B (k,j) ;
            A1 (j,k) =2*B (j,k) ;
        End
    end

    pg=inv (A1) *A2;

    for k=1:length (pg)       % Verificar limites de producao dos
geradores
        if pg (k) <C (k,4)
            pg (k) =C (k,4) ;
        end

        if pg (k) >C (k,5)
            pg (k) =C (k,5) ;
        end
    end

    p1=0;                     % Calcular Perdas

```

```

for k=1:m
    for j=1:m
        pl=pl+pg(k)*pg(j)*B(k,j);
    end

    pl=pl+B(k,m+1)*pg(k);
end

pl=pl+B(m+1,m+1);

if sum(cargas(:,2))+pl>sum(C(:,5))
    break
end

balanco=sum(pg)-(pc+pl); % Teste de Convergencia
if abs(balanco)<=erro
    flag=1;
    break
end

dhp=(hp-hp0)*((pc+pl-sum(pg))/(sum(pg)-sum(pg0))); % Actualizar
lambda

hp0=hp;
pg0=pg;
hp=hp+dhp;

end

lind=[];
for k=1:length(pg)
    lind(k)=(C(k,3)*2)*pg(k)+C(k,2);
end

resullambda=[hp;lind'];

```

```
resultadoslambdas=[resultadoslambdas resullambda];
resul2=[sum(cargas(:,2));hp;pg];
resultadoscomperdas=[resultadoscomperdas resul2];
resulpg=[resulpg pg];

cargas(:,2)=cargas(:,2)*1.1;
cargas(:,3)=cargas(:,3)*1.1;

if sum(cargas(:,2))>sum(C(:,5))
    break
end

end

resultadossemperdas
resultadoscomperdas

figure
subplot(2,1,1)
plot(resultadoscomperdas(1,:),resultadoscomperdas(2,:)), title('Custo
Marginal de Producao'); % Gráfico (x-Carga; y-Custo Marginal)
xlabel('Carga')
ylabel('Custo Marginal')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(resultadoscomperdas(1,:),resulpg), title('Despacho de cada grador');
% Gráfico (x-Carga; y-Produção)
xlabel('Carga')
ylabel('Produção')
grid on
legend('Pg1', 'Pg2', 'Pg4', 'Pg5', 'Pg6')
```

```
figure
plot(resultadoscomperdas(1,:),resultadoslambdas), title('Custos Marginais
de Produção Individuais'); % Gráfico (x-Carga; y-Custos Marginais)
xlabel('Carga')
ylabel('Custos Marginais')
grid on
legend('\lambda_t', '\lambda_{Pg1}', '\lambda_{Pg2}', '\lambda_{Pg4}',
'\lambda_{Pg5}', '\lambda_{Pg6}')
```

```
figure
plot(resultadoscomperdas(1,:),resultadoscomperdas(2,:),resultadoscomperda
s(1,:),resultadossemperdas(2:)), title('Comparação Custos Marginais de
Produção Com e Sem Perdas'); % Gráfico (x-Carga; y-Custos Marginais)
xlabel('Carga')
ylabel('Custos Marginais')
grid on
legend('\lambda - Com Perdas', '\lambda - Sem Perdas')
```