

DESPACHO ECONÔMICO DE UNIDADES TÉRMICAS EM CICLO COMBINADO UTILIZANDO REDES ADAPTATIVAS BASEADAS EM SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY-ANFIS

EDERSON C. SANTOS, ANDRÉ M. D. FERREIRA, PEDRO H. A. VIEIRA*, WILLIE D. TEIXEIRA

*Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA
Av. João Paulo II, 514 - Castanheira, Belém - PA, 66645-240*

**Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA
Rua Vera Paz, s/n, Bairro Salé, Santarém - PA, 68035-1100*

*E-mails: ederson.santos@ifpa.edu.br, andre.ferreira@ifpa.edu.br ,
pedro.vieira@ufopa.edu.br ,willie.teixeira@ifpa.edu.br*

Abstract— This paper deals a new method for solving the Economic Dispatch problem of thermal units in combined cycle. This proposition involves the training of a fuzzy inference system ANFIS type with real data input and output, to determine the steam generation unit, based on the powers of the gas units that are used as input parameters. From the unit steam value given by output the ANFIS, an analytical method is used to dispatch thermal units.

Keywords— Economic Dispatch, Combined Cycle, Fuzzy Control ,ANFIS, Thermal Units.

Resumo— O presente trabalho trata da um novo método para solução do problema do Despacho Econômico de unidade térmicas em ciclo combinado. Esta proposição envolve o treinamento de um sistema de inferência fuzzy do tipo ANFIS com dados reais de entrada e saída, para determinar a geração da unidade à vapor, baseado nas potências das unidades à gás que são usadas como parâmetros de entrada. A partir do valor da unidade à vapor dado pela saída do ANFIS, um método analítico é utilizado para despachar as unidades a gás.

Palavras-chave— Despacho Econômico, Ciclo Combinado, Controle Fuzzy, ANFIS, Termoelétrica.

1 Introdução

Como no caso do petróleo, a indústria do gás natural nasceu nos Estados Unidos, na segunda metade do século XIX (Santos, 2002). No final do mesmo século na Rússia, e em meados do século XX na Europa, observado a necessidade de diversificação das suas matrizes energéticas, vários governos passaram a investir fortemente nessa indústria.

As vantagens ambientais, descobertas de diversas jazidas e aumento no preço do barril de petróleo, impulsionaram a exploração de gás natural que no ano de 2009 atingiu a marca de 20,9% do fornecimento de energia de primária a nível mundial, Figura 1:

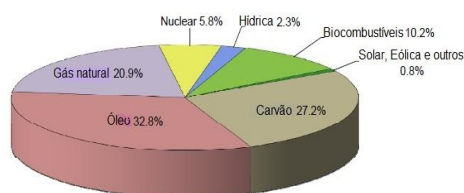


Figura 1. Fornecimento total de energia primária a nível mundial em 2009. Adaptado de International Energy Agency, 2011.

Em 13 de fevereiro de 1995 é criada a Lei 8987 que possibilita a institucionalização de Produtores Independentes de Energia (PIE). A partir desta data

empresas ou pessoas jurídicas podem explorar e prestar serviços públicos de energia elétrica.

Neste contexto, o sistema proposto por este artigo, visa solucionar o problema do despacho econômico de turbinas a gás que funcionam a ciclo combinado.

2 Despacho Econômico

Para atender à demanda de energia solicitada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), as usinas devem fazer o chamado Despacho da Geração que define o número de geradores e a potência a ser fornecida para se atender à demanda, à medida que a carga varia ao longo do tempo.

Já o conceito de Despacho Econômico da Geração vem sendo amplamente abordado nos últimos anos por pesquisadores do mundo todo devido a este ter se tornado um assunto de alta relevância na área de controle de sistemas elétricos de potência.

O real objetivo do Despacho Econômico é fazer com que o consumo de combustível das unidades geradoras ou o custo de operação do sistema como um todo seja minimizado através da determinação da potência de saída de cada unidade geradora, sob condições de restrição da demanda de carga (J.Zhu,2009). Para Palanichamy e Babu (Palanichamy & Babu, 2007) o problema do Despacho Econômico Clássico é encontrar a combinação ótima de potência dos geradores que minimiza o custo total de

combustível enquanto satisfaz uma demanda solicitada.

O problema do Despacho Econômico pode ser descrito pela seguinte equação quadrática, Equação (1):

$$F_T = \sum_{i=1}^n (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \text{ \$ / h} \quad (1)$$

Onde:

- F_T : Custo total de combustível (\$/h);
- P_{Gi} : Potência gerada na i-ésima unidade geradora (MW);
- a_i , b_i e c_i : coeficientes do custo de combustível da i-ésima unidade geradora;
- n : número de unidades geradoras.

O problema do despacho econômico deve ser otimizado levando em consideração as seguintes restrições:

A potência total gerada deve atender a uma demanda total mais as perdas na transmissão como mostra a Equação (2):

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D + P_L \text{ MW} \quad (2)$$

Onde:

- P_D : Demanda de carga total (MW);
- P_L : total de perdas na transmissão (MW);

Para este trabalho especificamente, não serão consideradas as perdas na transmissão, pois a distância entre a geração e o barramento de interligação com o sistema é muito pequena.

Outra restrição é que a potência gerada por cada unidade geradora está restrita entre um limite mínimo e máximo, Equação (3):

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (3)$$

3 Ciclo Combinado

A operação de uma usina em ciclo combinado pode ser definida como a combinação de dois ciclos térmicos em uma planta (Kehlhofer, *et.al.*,2009). Em usinas térmicas que utilizam gás natural como combustível de queima, normalmente utiliza-se uma turbina à gás em conjunto com uma turbina à vapor para formar o ciclo combinado. Segundo Siqueira (Siqueira,2007), este tipo de usina vem sendo adotada no mundo todo, desde a década de 80 e deverá ser a solução escolhida para a grande maioria das termelétricas brasileiras à gás que serão construídas nos próximos anos.

Um diagrama simplificado de um sistema de geração em Ciclo Combinado pode ser visto através da Figura 2.

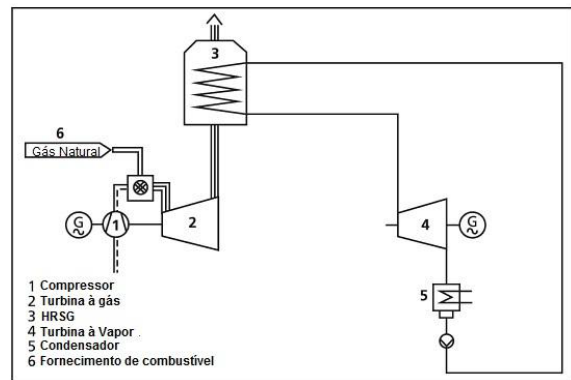


Figura 2. Diagrama simplificado de esquema operando em ciclo combinado.

A eficiência de uma turbina à gás operando em ciclo aberto chega a ser em torno de 36% a 40%, já que mais de 60% do calor gerado pela queima do gás é perdido nos gases de exaustão. Em uma usina que possui planta operando em ciclo combinado, acopla-se uma turbina à vapor à turbina à gás por meio de uma caldeira de recuperação de calor, chamada de HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Esta caldeira tem a função de recuperar parte do calor perdido pela turbina à gás para produzir vapor que aciona uma outra turbina, sem necessidade de queima de outro combustível, desta forma, pode-se alcançar níveis de eficiência acima de 50%.

A utilização deste tipo de sistema justifica-se em função da maior eficiência termodinâmica que o mesmo proporciona quando comparado com ciclos térmicos tradicionais, além de causar menores danos ao meio ambiente já que a turbina à vapor não produz gases nocivos à atmosfera.

4 Controle Fuzzy

O controle Fuzzy baseado na lógica Fuzzy traz a Engenharia de Controle novas perspectivas para a solução de sistemas antes intratáveis. Sendo atualmente empregado em vários campos do conhecimento científico, como sistemas de telecomunicações, robótica, sistemas autônomos, processos químico e industriais, medicina (Ferreira,2009), o controle Fuzzy consolidou-se como uma estratégia poderosa e confiável para o controle de sistemas não lineares e invariantes no tempo (Gomide & Gudwin,1994).

Tal capacidade devesse ao fato da lógica Fuzzy lidar com variáveis linguísticas, o que possibilita a formulação lógica de determinado sistema, sem a necessidade da modelagem matemática do mesmo. Assim, para sistemas cuja formulação matemática é de extrema complexidade o controle Fuzzy apresenta-se como uma boa estratégia de controle.

Para sistemas mais complexos cuja entrada e saída são parâmetros conhecidos, uma boa estratégia de controle é proposto por Jyh-Shing Roger Jang (Jang,1993). O algoritmo ANFIS (Adaptative Network Based Fuzzy Inference System), tem por

objetivo mapear os dados do sistema e obter um conjunto de regras SE-ENTÃO Fuzzy com funções de pertinência adequadas para mapear de forma adequada um conjunto de dados de entrada e saída.

Para isto é utilizado um sistema de inferência Fuzzy implementado usando redes adaptativas, cujo os parâmetros Fuzzy são calculados através da técnica de retropropagação do erro (Backpropagation error).

5 Metodologia

Os dados utilizados para realização deste trabalho foram coletados de uma usina termelétrica em operação no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, esta usina, possui três unidades geradoras à gás e uma unidade geradora à vapor que podem trabalhar tanto em ciclo aberto, quanto em ciclo combinado, sendo os valores máximos de geração de cada uma das três unidades à gás em torno de 180MW e a geração máxima da unidade à vapor ficando ao redor de 270 MW.

Nas observações dos dados coletados da usina operando com geração em ciclo combinado, pôde-se constatar que a geração da turbina à vapor era, aproximadamente, 50% do valor da soma das gerações das turbinas à gás. Porém essa relação é influenciada, para mais ou para menos, em função do valor da temperatura ambiente. Neste trabalho utilizou-se uma rede ANFIS treinada a partir do mapeamento dos dados de entrada e saída coletados da usina, sendo as entradas da rede os valores de geração das unidades à gás e a temperatura ambiente (4 entradas) e como saída, a geração da unidade à vapor (1 saída).

O treinamento da rede foi feito utilizando-se a toolbox ANFIS do MATLAB com 3 funções Gaussianas de 2ª ordem para cada entrada da rede; 300 épocas de treinamento e utilização do método Backpropagation. Foi utilizada uma matriz de 25.000 linhas de dados para treinamento e outra com 13.778 linhas de dados utilizada para verificação.

As funções de pertinência antes e depois do treinamento são ilustradas nas Figuras 3 e 4 respectivamente.

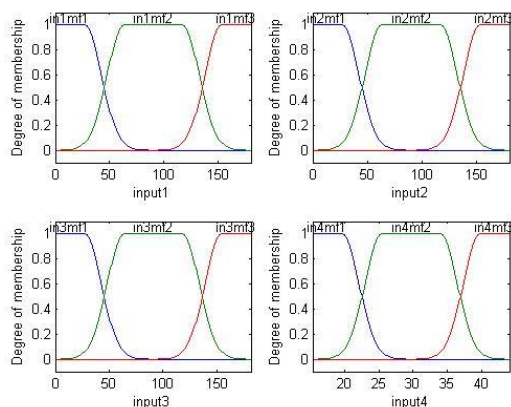


Figura 3. Funções de pertinência das 4 entradas antes do treinamento.

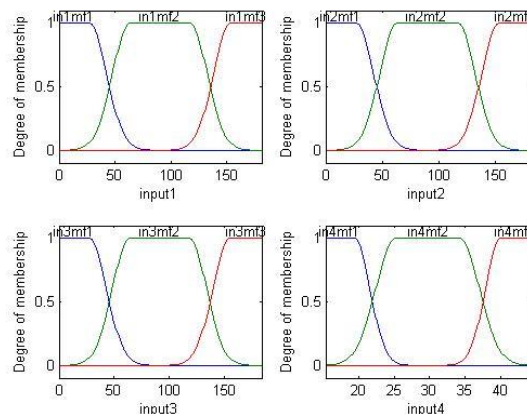


Figura 4. Funções de pertinência das 4 entradas após o treinamento.

A evolução do processo de treinamento da rede ANFIS pode ser vista através da Figura 5, onde a curva em azul ilustra a evolução do erro médio quadrático para os dados de treinamento que chegou a um valor de 12,0345 e a curva em verde dos dados de verificação que chegou a um valor de 15,2794. Para obtenção dos coeficientes a, b e c da função quadrática que rege o despacho econômico, foi necessário a coleta de dados para obtenção de uma curva de custo de combustível em função da potência para cada unidade geradora conforme a Figura 6.

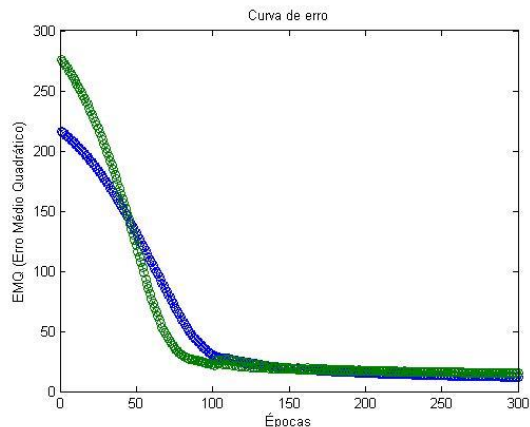


Figura 5. Evolução do erro médio quadrático da rede ANFIS treinada com método Backpropagation.

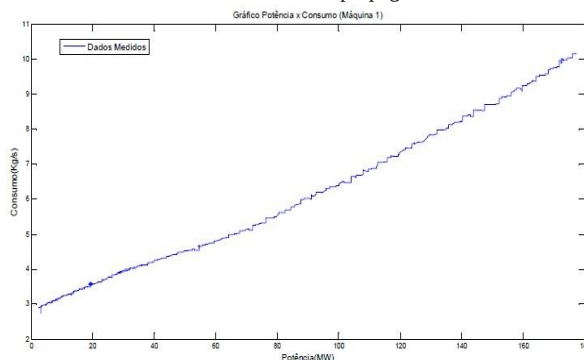


Figura 6. Curva Potência x Custo da unidade geradora à gás 1.

As outras duas unidades geradoras à gás possuem curvas muito semelhantes a curva mostrada na

Figura 1. De posse das curvas das 3 unidades à gás, os coeficientes a, b e c foram obtidos através da toolbox do MATLAB, *polyfit*, que aplica a teoria dos mínimos quadrados para obtenção da aproximação de uma função.

Após obtenção da função custo o cálculo do despacho econômico para as unidades à gás pôde então ser efetuado.

Com a rede ANFIS treinada o algoritmo proposto para a solução do despacho econômico neste trabalho foi implementado da seguinte maneira: Como a geração da unidade à vapor depende da geração das unidades à gás, inicia-se o processo estabelecendo-se que o valor da geração da unidade à vapor é a metade da geração à gás. O valor da geração à vapor é então subtraído da demanda e o valor restante é utilizado para despachar as demais unidades à gás utilizando método analítico proposto por (Palanichamy & Babu, 2007). Os novos valores encontrados para as unidades à gás são repassados à rede ANFIS juntamente com a temperatura ambiente, obtendo-se um novo valor para a geração à vapor e, desta forma, o processo iterativo continua até que uma tolerância de convergência estabelecida de 0,01 MW seja atingida. A Figura 7 apresenta um fluxograma do método proposto.

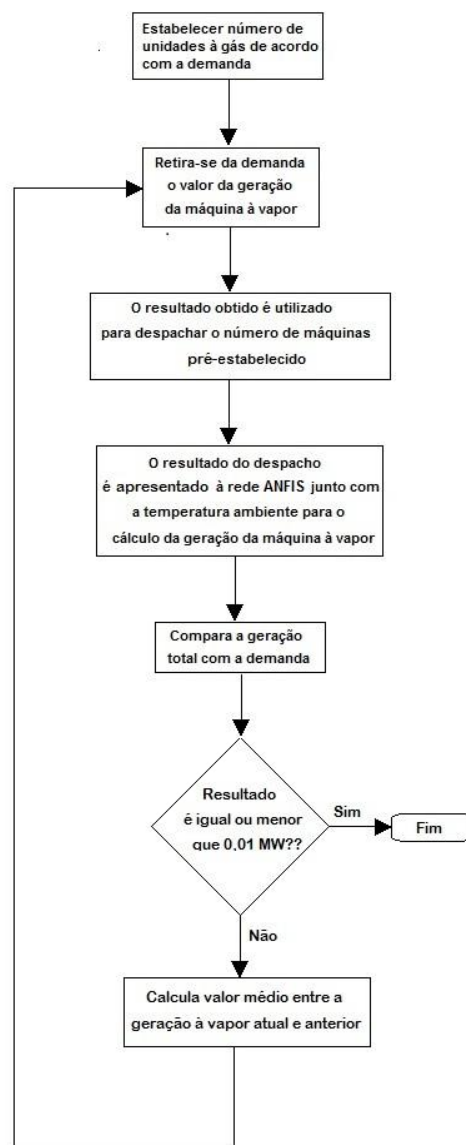


Figura 7. Fluxograma do despacho econômico proposto com rede ANFIS e método analítico.

6 Resultados

O resultado da obtenção dos coeficientes a, b e c das curvas características das unidades à gás após a aplicação da função *polyfit* do MATLAB pode ser visualizada pela Tabela 1, onde M1, M2 e M3 correspondem a cada uma das unidades à gás.

Tabela 1. Coeficientes da função custo do despacho econômico.

	a	b	c
M1	0,00007656110 7426	0,0269329056339 94	2,977405284904 682
M2	0,00007485242 9368	0,0278747274587 71	2,886750201570 591
M3	0,00007052312 4521	0,0279361289360 79	2,902670353199 474

Para obtenção dos resultados do despacho econômico, foram realizados testes utilizando-se o algoritmo proposto combinando-se as 3 unidades à gás com a vapor (configuração 3+1), combinação de 2 unidades à gás com a vapor (configuração 2+1) e também cada unidade à gás isoladamente com a unidade à vapor (configuração 1+1), em vários pontos de operação. Nas Tabelas 2, 3 e 4 são mostradas comparações de alguns dados reais medidos com os resultados obtidos da saída da rede ANFIS do método proposto para diferentes valores de demanda, onde PG1, PG2 e PG3 representam os valores da geração das unidades térmicas à gás; PG4 representa o valor da geração da unidade à vapor, Ta é a temperatura ambiente e o Custo representa o gasto de combustível necessário para a geração de energia, expresso em Kg/s.

Tabela 2. Resultado do Despacho Econômico para demanda de 783,679 MW.

Demanda = 783,679 MW		
	Dado Real	Resultado Obtido
	(3+1)	(3+1)
PG1 MW)	168,938	168,888
PG2 MW)	167,608	166,452
PG3 MW)	171,634	175
PG4 MW)	275,500	273,339
Ta (°C)	30,499	30,499
Custo(Kg/s)	30,069	29,261

Tabela 3. Resultado do Despacho Econômico para demanda de 448,494 MW.

Demanda = 448,494 MW			
	Dado Real	Resultado Obtido	
	(3+1)	(2+1)	(3+1)
PG1 (MW)	99,902	0	92,548
PG2 (MW)	99,958	147,626	88,369
PG3 (MW)	99,987	156,253	93,359
PG4 (MW)	148,650	144,614	174,218
Ta (°C)	25,068	25,068	25,068
Custo(Kg/s)	19,61	17,623	18,186

Tabela 4. Resultado do Despacho Econômico para demanda de 175,741 MW.

Demanda = 175,741 MW		
	Dado Real	Resultado Obtido
	(1+1)	(1+1)
PG1 (MW)	0	0
PG2 (MW)	0	0
PG3 (MW)	119,998	120,783
PG4 (MW)	55,743	54,958
Ta (°C)	26,4	26,4
Custo (Kg/s)	7,486	7,306

7 Conclusões

Os métodos clássicos para Despacho Econômico de unidades geradoras não apresentam resultados satisfatórios quando aplicados diretamente para o caso de usinas térmicas que operam em ciclo combinado. Desta forma, a principal contribuição deste trabalho é a utilização da metodologia proposta, que combina a utilização de um método analítico apresentado por (Palanichamy & Babu, 2007) (com excelentes resultados para aplicações de Despacho Econômico para unidades geradoras em ciclo aberto) com uma rede ANFIS previamente treinada a partir dos dados de uma usina termoeletrica.

Referências Bibliográficas

- Ferreira, C.(2009). Estudo comparativo entre Técnicas de controle Fuzzy, PI e Adaptativo Aplicado ao Processo de fabricação do Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tuni. Universidade Estadual de Londrina.
- Gomide, C. A. F.; Gudwin, R. R.(1994). Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. Edª SBA. Controle e Automação.Vol.4 nº3.
- JANG, J.R. ANFIS: Adaptive-Network- Based Fuzzy Inference System in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 23, n. 3, May/June, 1993.
- Kehlhofer, R.; Hannemann, F.; Stirnimann, F. and Rukes, B. (2009). Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants, 3rd ed., PenWell.
- Rodrigues, E. J (2011). Setor Elétrico Brasileiro: Estrutura, funcionamento, instituições e perspectivas para o controle, 1ª Ed.
- Santos, E.M. *et al.*(2002). Gás natural estratégias para uma nova energia no Brasil. Annablume Editora.ed 1ª. pp.73-184.
- Siqueira, J. L.; Carvalho Jr, J. A.; Villela, I. A. C. (2004). "Combined cycle versus one Thousand diesel power plants: pollutant emissions, ecological efficiency and economic analysis", IEEE Renewable & Sustainable Energy Reviews, pp. 524-535.
- Palanichamy, C.; Babu, N. S. (2007). "Analytical solution for combined economic and emissions dispatch" IEEE Electric Power System Research, pp. 1129-113.
- Zhu, J. (2009). Optimization of Power System Operation, Wiley. International Energy Agency (IEA). Share of total primary energy supply in 2009.